

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO  
EXERGOAMBIENTAL DE PLANTAS  
TERMOELÉTRICAS OPERANDO EM COMBUSTÃO  
COMBINADA CARVÃO-BIOMASSA**

**ÁLVARO HERNÁN RESTREPO VICTORIA**

**Florianópolis, SC**

**2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO  
EXERGOAMBIENTAL DE PLANTAS  
TERMOELÉTRICAS OPERANDO EM COMBUSTÃO  
COMBINADA CARVÃO-BIOMASSA**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa  
Catarina para obtenção do grau de Doutor em  
Engenharia Mecânica

**ÁLVARO HERNÁN RESTREPO VICTORIA**

**Florianópolis, Julho de 2012**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Restrepo Victoria, Álvaro Hernán  
Metodologia de análise e avaliação exergoambiental de  
plantas termoeletricas operando em combustão combinada  
carvão - biomassa [tese] / Álvaro Hernán Restrepo  
Victoria ; orientador, Edson Bazzo - Florianópolis, SC,  
2012.  
177 p. ; 21cm

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Geração termoeletrica. 3.  
Exergia. 4. Análise do ciclo de vida. 5. Análise  
exergoambiental. I. , Edson Bazzo. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO**  
**EXERGOAMBIENTAL DE PLANTAS TERMOELÉTRICAS**  
**OPERANDO EM COMBUSTÃO COMBINADA**  
**CARVÃO-BIOMASSA**

**ÁLVARO HERNÁN RESTREPO VICTORIA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

**DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Área de concentração em Engenharia e Ciências Térmicas**

sendo aprovada em sua forma final.

---

Prof. Edson Bazzo, Dr. Eng – Orientador.

---

Prof. Júlio César Passos, Dr. – Coordenador do curso.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Edson Bazzo, Dr. Eng – Presidente.

---

Profa. Cássia Maria Ugaya, Dr. Eng – Relatora.

---

Profa. Silvia Azucena Nebra, Dr. Eng.

---

Prof. Paulo Smith Schneider, Dr.

---

Prof. Rogério Gomes de Oliveira, Dr. Eng.

---

Prof. Júlio César Passos, Dr.



*“Parece-me que é necessário um equilíbrio muito cuidadoso entre duas necessidades conflitantes: o escrutínio mais cético de todas as hipóteses que nos são oferecidas e ao mesmo tempo uma grande abertura a novas ideias. Obviamente que essas duas modalidades do pensamento estão em alguma tensão. Mas se você puder exercitar somente uma delas, qualquer que seja, você tem um problema sério. Se você for somente cético, então nenhuma ideia nova chega até você. Você nunca aprende nada de novo. Você se transforma em um velho excêntrico convencido de que o absurdo é que governa o mundo (evidentemente que há muitos dados para lhe dar apoio.). Mas, de quando em quando, talvez uma vez em cem casos, uma nova ideia acaba acertando, válida e maravilhosa. Se você estiver no hábito demasiado forte de ser cético com tudo, você não a perceberá ou se sentirá agredido, e de qualquer maneira estará barrando o caminho da compreensão e do progresso.”*

*Carl Sagan*





*A meus pais e irmãos, pelo amor, apoio e incentivo.*

*A meu filho Álvaro José.*

*A meus professores.*



# *Agradecimentos*

Ao Prof. Edson Bazzo, pela acolhida no LabCET - Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, assim como pelos ensinamentos, orientação, acompanhamento e confiança, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos professores da POSMEC-UFSC, que fizeram parte deste processo pelos ensinamentos e colaborações durante a minha estadia na UFSC.

Aos demais colaboradores e funcionários da POSMEC-UFSC.

Aos membros da banca examinadora, pela disposição e pelas valorosas contribuições realizadas.

À Universidad Tecnológica de Pereira e aos colegas da Facultad de Ingeniería Mecánica, dessa universidade.

À CAPES, pelo apoio econômico.

À ANEEL e à Tractebel Energia S.A., pelo suporte financeiro para a realização do projeto.

A Eva, pelo amor incondicional, pela compressão e pelo apoio permanente durante a realização deste trabalho.

A minha família e amigos na Colômbia pelo interesse e pela confiança em mim depositada.

A toda a galera da Colômbia pelo companheirismo e apoio em diversos momentos durante minha estadia na ilha da magia.

Aos caros colegas de laboratório, pelos conhecimentos compartilhados.



# *Sumário*

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxiii</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>xxvii</b>
<b>Resumo</b>	<b>xxix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xxxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização do problema . . . . .	1
1.1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	6
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	6
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	6
1.3 Contribuições pretendidas . . . . .	6
1.4 Organização da tese . . . . .	7
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>9</b>
2.1 Resenha histórica . . . . .	9
2.2 A propriedade exergia . . . . .	11

2.3	Avaliação do ciclo de vida . . . . .	12
2.3.1	Análise de sistemas termodinâmicos . . . . .	14
2.4	O processo de combustão combinada . . . . .	18
2.4.1	Alternativas tecnológicas . . . . .	21
2.4.2	Aspectos ambientais . . . . .	23
2.5	Síntese do capítulo . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Proposta metodológica</b>	<b>25</b>
3.1	Estrutura da proposta metodológica . . . . .	25
3.2	Análise geral do problema . . . . .	26
3.2.1	Passo 1: Reconhecimento do problema . . . . .	27
3.2.2	Passo 2: Análise exergética e ambiental . . . . .	27
3.2.2.1	Análise ambiental geral . . . . .	28
3.2.2.2	Análise exergética geral . . . . .	30
3.2.3	Passo 3: Análise dos resultados . . . . .	32
3.3	Análise local do problema . . . . .	35
3.3.1	Passo 4: Análise exergoambiental . . . . .	35
3.3.1.1	Primeira parte: a análise exergética . . . . .	35
3.3.1.2	Segunda parte: a análise ambiental . . . . .	37
3.3.1.3	Terceira parte: balanço exergoambiental . . . . .	39
3.3.2	Passo 5: Análise dos resultados . . . . .	46
3.4	Síntese do capítulo . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Análise geral do processo de geração termoeletrica</b>	<b>47</b>
4.1	Passo 1: Reconhecimento do problema . . . . .	47
4.1.1	Descrição da usina termoeletrica . . . . .	48
4.1.2	Descrição da rota do carvão . . . . .	50

4.1.2.1	Primeira etapa da rota do carvão: processo de mineração . . . . .	51
4.1.2.2	Segunda etapa da rota do carvão: transporte mina - usina termoeletrica . . . . .	56
4.1.2.3	Terceira etapa da rota do carvão: processamento . . . . .	57
4.1.3	Definição da rota da biomassa . . . . .	57
4.1.3.1	Primeira etapa da rota da biomassa: processo na lavoura . . . . .	61
4.1.3.2	Segunda etapa da rota da biomassa: transporte lavoura - usina termoeletrica . . . . .	64
4.1.3.3	Terceira etapa da rota da biomassa: processamento . . . . .	65
4.2	Passo 2: Análise exergética e ambiental . . . . .	67
4.2.1	Avaliação do cenário A: operação 100% carvão . . . . .	67
4.2.1.1	Análise ambiental . . . . .	68
4.2.1.2	Análise exergética . . . . .	78
4.2.2	Avaliação do cenário B: operação em combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa . . . . .	80
4.2.2.1	Análise ambiental . . . . .	81
4.2.2.2	Análise exergética . . . . .	89
4.3	Passo 3: Análise dos resultados . . . . .	92
4.3.1	Avaliação exergética e ambiental do cenário A . . . . .	93
4.3.1.1	Análise exergética . . . . .	93
4.3.1.2	Análise ambiental . . . . .	94
4.3.2	Avaliação exergética e ambiental do cenário B . . . . .	97
4.3.2.1	Análise exergética . . . . .	97
4.3.2.2	Análise ambiental . . . . .	98
4.4	Síntese do capítulo . . . . .	100

<b>5</b>	<b>Análise local da usina termoeletrica</b>	<b>101</b>
5.1	Passo 4: Análise exergoambiental . . . . .	101
5.1.1	Análise exergética . . . . .	101
5.1.2	Análise ambiental . . . . .	105
5.1.3	Balanco exergoambiental . . . . .	107
5.2	Passo 5: Análise dos resultados . . . . .	119
5.2.1	Cenário A: operação atual com 100% carvão . .	119
5.2.2	Cenário B: operação em combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa . . . . .	123
5.3	Fator exergoambiental global ( $f_{GEE}^{ea}$ ) . . . . .	126
5.4	Síntese do capítulo . . . . .	131
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>133</b>
6.1	Conclusões gerais . . . . .	133
6.2	Sugestões para futuros trabalhos . . . . .	136
	<b>Referências</b>	<b>137</b>
	<b>Apêndice A Rota do carvão: equipamentos e consumos</b>	<b>145</b>
A.1	Primeira etapa: processo de mineração . . . . .	145
A.2	Segunda etapa: transporte . . . . .	148
A.3	Terceira etapa: processamento (pré-combustão) . . . . .	152
	<b>Apêndice B Rota da biomassa: equipamentos e consumos</b>	<b>155</b>
B.1	Primeira etapa: processo na lavoura . . . . .	155
B.2	Segunda etapa: transporte . . . . .	157
B.3	Terceira etapa: processamento (pré-combustão) . . . . .	158
	<b>Apêndice C Análise termodinâmica do ciclo</b>	<b>161</b>



---

<b>Apêndice D</b>	<b>Análise ambiental categoria de impacto: aci-</b>	
	<b>dificação</b>	<b>167</b>
<b>Apêndice E</b>	<b>Modelo de combustão</b>	<b>169</b>



# *Lista de Figuras*

Figura 1.1 – Matriz energética mundial. . . . .	2
Figura 1.2 – Oferta de energia elétrica no Brasil. . . . .	3
Figura 1.3 – Fronteira definida para a pesquisa. . . . .	5
Figura 2.1 – Componentes da exergia de corrente. . . . .	11
Figura 2.2 – Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto. . . . .	13
Figura 2.3 – Alternativas para a combustão combinada carvão - biomassa. . . . .	22
Figura 2.4 – Etapas do processamento da biomassa. . . . .	24
Figura 3.1 – Estrutura da proposta metodológica para a análise exergética e ambiental. . . . .	26
Figura 3.2 – Procedimento para elaboração do inventário do ciclo de vida. . . . .	29
Figura 3.3 – Fronteira considerando as etapas do sistema. . .	32
Figura 3.4 – Fronteira local do problema e impactos ambientais considerados. . . . .	38
Figura 3.5 – Conjunto de curvas características do processo de geração termoeletrica. . . . .	44
Figura 3.6 – Curva de operação do sistema em condição Carnot. .	45
Figura 4.1 – Identificação da fronteira. . . . .	48
Figura 4.2 – Vista aérea do complexo termoeletrico Jorge Lacerda. . . . .	49
Figura 4.3 – Ciclo térmico. . . . .	50
Figura 4.4 – Rotas tecnológicas em mineração subterrânea. .	51

Figura 4.5 – Etapas definidas para a rota do carvão. . . . .	52
Figura 4.6 – Operações durante a lavra. . . . .	53
Figura 4.7 – Transporte do carvão ROM (frente de mina - superfície). . . . .	54
Figura 4.8 – Fluxograma circuito de água Carbonífera Criciúma.	55
Figura 4.9 – Manuseio do carvão energético no complexo ter- moelétrico Jorge Lacerda. . . . .	58
Figura 4.10 – Movimentação do carvão energético no complexo termoelétrico. . . . .	59
Figura 4.11 – Fluxograma proposto na avaliação do cenário A.	60
Figura 4.12 – Etapas definidas para a rota da biomassa. . . .	62
Figura 4.13 – Equipamentos utilizados na lavoura. . . . .	63
Figura 4.14 – Área selecionada e caminhões utilizados para o transporte. . . . .	64
Figura 4.15 – Equipamentos para o processamento (pré-combustão) da palha de arroz. . . . .	66
Figura 4.16 – Fluxograma proposto na avaliação do cenário B.	67
Figura 4.17 – Fluxograma do modelo de avaliação ambiental para o cenário A. . . . .	69
Figura 4.18 – Emissão de $\text{CO}_2\text{-eq}$ por MWh no cenário A. . .	77
Figura 4.19 – Razão de exergia consumida no cenário A. . . .	80
Figura 4.20 – Fluxograma do modelo de avaliação ambiental para o cenário B. . . . .	81
Figura 4.21 – Emissão de $\text{CO}_2\text{-eq}$ por MWh emitidos no cenário B. . . . .	90
Figura 4.22 – Razão de exergia consumida no cenário B. . . .	92
Figura 4.23 – Diagrama de Sankey relativo aos fluxos de exer- gia do cenário A. . . . .	93
Figura 4.24 – Fluxograma de impacto ambiental específico com base na unidade funcional das etapas do cenário A. . . .	94

Figura 4.25 – Análise de sensibilidade correspondente ao ciclo térmico da usina no cenário A. . . . .	96
Figura 4.26 – Diagrama de Sankey relativo aos fluxos de exergia do cenário B. . . . .	97
Figura 4.27 – Fluxograma de impacto ambiental específico com base na unidade funcional das etapas do cenário B. . . .	98
Figura 5.1 – Ciclo térmico simplificado da usina termoeletrica.	102
Figura 5.2 – Diagrama de Sankey dos fluxos de exergia (cenário A). . . . .	103
Figura 5.3 – Impacto ambiental específico direto e indireto relacionado aos cenários A e B. . . . .	105
Figura 5.4 – Fluxos considerados para o balanço exergoambiental no gerador de vapor. . . . .	108
Figura 5.5 – Fluxo de impacto exergoambiental do cenário A.	120
Figura 5.6 – Fluxo de impacto exergoambiental do cenário B.	123
Figura 5.7 – Curva característica de eficiência Carnot para uma máquina térmica. . . . .	127
Figura 5.8 – Curva característica do sistema no cenário A. .	128
Figura 5.9 – Curva do sistema para diferentes condições de operação. . . . .	129
Figura 5.10 – Fator exergoambiental global para diferentes condições de operação. . . . .	130
Figura B.1 – Equipamentos utilizados na lavoura. . . . .	156
Figura B.2 – Caminhões utilizados no transporte da biomassa.	157
Figura B.3 – Sistema pré-combustão da biomassa. . . . .	159
Figura C.1 – Ciclo termodinâmico da UTLA-1. . . . .	161
Figura D.1 – Categoria de impacto: acidificação (cenário A) .	168
Figura D.2 – Categoria de impacto: acidificação (cenário B) .	168
Figura E.1 – Esquema do modelo combustão. . . . .	169



# *Lista de Tabelas*

Tabela 2.1 – Emissões de GEE de plantas de geração termoelétrica a carvão. . . . .	15
Tabela 3.1 – Termos definidos na avaliação do impacto do ciclo de vida. . . . .	30
Tabela 4.1 – Características operacionais da UTLA-1. . . . .	49
Tabela 4.2 – Análise elementar do carvão no sul do estado de Santa Catarina. . . . .	50
Tabela 4.3 – Balanço de massa dos produtos obtidos durante o beneficiamento do carvão ROM. . . . .	56
Tabela 4.4 – Análise elementar da palha de arroz no sul do estado de Santa Catarina. . . . .	60
Tabela 4.5 – Definição da categoria de impacto. . . . .	68
Tabela 4.6 – Inventário do ciclo de vida carvão energético. Unidade funcional: 1 kg de carvão. . . . .	73
Tabela 4.7 – Inventário do ciclo de vida usina termoelétrica. Unidade funcional: 1 MWh. . . . .	88
Tabela 5.1 – Parâmetros de desempenho (cenários A e B). . .	103
Tabela 5.2 – Exergia destruída e eficiência exergética dos equipamentos do ciclo termodinâmico. . . . .	104
Tabela 5.3 – Variáveis exergoambientais da usina termoelétrica. Cenário A. . . . .	122
Tabela 5.4 – Variáveis exergoambientais da usina termoelétrica. Cenário B. . . . .	125
Tabela A.1 – Equipamentos e consumos nominais referentes ao processo de mineração subterrânea. . . . .	146

Tabela A.2 – Consumos nominais referentes às esteiras transportadoras no subsolo. . . . .	146
Tabela A.3 – Equipamentos e consumos nominais referentes à caixa de embarque. . . . .	147
Tabela A.4 – Consumos nominais referentes aos exaustores de ventilação. . . . .	147
Tabela A.5 – Consumos nominais referentes ao sistema de bombeamento da DAM. . . . .	148
Tabela A.6 – Consumos nominais referentes aos equipamentos auxiliares. . . . .	149
Tabela A.7 – Equipamentos referentes ao processo de britagem	149
Tabela A.8 – Equipamentos referentes ao processo de lavagem.	150
Tabela A.9 – Produção anual no processo miração. . . . .	151
Tabela A.10 – Características das locomotivas da Ferrovia Te- reza Cristina. . . . .	151
Tabela A.11 – Indicadores associados ao transporte do carvão.	152
Tabela A.12 – Equipamentos e consumos nominais na seção de recebimento do carvão energético. . . . .	153
Tabela B.1 – Características referentes à maquinaria utilizada na lavoura. . . . .	156
Tabela B.2 – Características referentes aos caminhões utiliza- dos no transporte dos fardos. . . . .	157
Tabela B.3 – Equipamentos e consumo nominal referentes ao sistema de processamento (pré-combustão) da biomassa.	158
Tabela B.4 – Informações referentes aos trabalhos obtenção de fardos. . . . .	159
Tabela C.1 – Características operacionais da UTLA-1. . . . .	162
Tabela C.2 – Exergia destruída e eficiência exergética dos equi- pamentos do ciclo termodinâmico . . . . .	164



Tabela C.3 – Parâmetros de desempenho (cenário A com 100% carvão e cenário B com participação da biomassa até 30% em base energética). . . . .	165
Tabela E.1 – Fração molar das espécies por kg de combustível (cenário A com 100% carvão e cenário B com participação da biomassa em até 30% em base energética). .	174
Tabela E.2 – Indicador referente às espécies por MWh gerado (cenário A com 100% carvão e cenário B com participação da biomassa em até 30% em base energética). .	175
Tabela E.3 – Espécies consideradas em equilíbrio químico em [kmol espécie $i$ /kg comb]. . . . .	176
Tabela E.4 – Indicador das espécies em [kg espécie $i$ /MWh]. .	177



# *Lista de Símbolos*

## **Símbolos gerais**

$a$	Ar
$b$	Impacto ambiental específico [kg CO <sub>2-eq</sub> /MWh]
$\dot{B}$	Fluxo do impacto exergoambiental [kg CO <sub>2-eq</sub> /s]
$e$	Exergia específica [kJ/kg]
$E$	Exergia [kJ]
$\dot{E}$	Fluxo exergético [kJ/s]
$EA$	Excesso de ar [adimensional]
$f$	Fator exergoambiental [adimensional]
$h$	Entalpia [kJ/kg]
$h_f$	Fração energética [adimensional]
$I$	Indicador de inventário do ciclo de vida
$m_f$	Fração de massa [adimensional]
$M_w$	Massa molar [kg/kmol]
$\dot{m}$	Fluxo de massa [kg/s]
$N$	Número de moles [mol]
$p$	Pressão [Pa]
$\dot{Q}$	Fluxo de energia em forma de calor [kJ/s]
$r$	Diferença relativa do impacto ambiental específico [adimensional]
$T$	Temperatura [°C ou K]

$\dot{W}$	Potência de eixo [kJ/s]
$\dot{W}_e$	Potência elétrica [kJ/s]
$y$	Razão de destruição de exergia ou fração molar [adimensional]
$\dot{Y}$	Fluxo de impacto ambiental associado ao enésimo componente [kg CO <sub>2-eq</sub> /s]
$\dot{V}$	Fluxo volumétrico [m <sup>3</sup> /mês]

## Símbolos gregos

$\beta$	Relação entre a exergia química e o poder calorífico do substâncias orgânicas secas [adimensional]
$\eta$	Eficiência [adimensional]
$\phi$	Umidade relativa [Equação (E.3)]

## Sub-índices

$ar$	Ar
$aap$	Aquecedor de alta pressão
$abp$	Aquecedor de baixa pressão
$ba$	Bomba de alimentação
$bc$	Bomba de condensação
$C$	Carbono
$comb$	Combustível
$cond$	Condensador
$D$	Destruída
$des$	Desaereador
$dir$	Direto

---

<i>diss</i>	Dissipativo
<i>e</i>	Entrada
<i>ele</i>	Elétrico
<i>eq</i>	Equivalente
<i>es</i>	Estequiométrico
<i>f</i>	Fonte
<i>g</i>	Gás
<i>gv</i>	Gerador de vapor
<i>H</i>	Hidrogênio
$H_2O$	Água
<i>i</i>	Espécie
<i>ind</i>	Indireto
<i>j</i>	jth fluxo
<i>n</i>	Enésimo
<i>N</i>	Nitrogênio
<i>O</i>	Oxigênio
<i>p</i>	Produto
<i>S</i>	Enxofre
<i>s</i>	Saída
<i>tap</i>	Turbina alta pressão
<i>tbp</i>	Turbina baixa pressão
<i>tanque</i>	Tanque
<i>v</i>	Válvula
<i>vc</i>	Volume de controle
<i>w</i>	Trabalho

$z$	Etapa
$I$	Primeira lei da termodinâmica
$II$	Segunda lei da termodinâmica
$0$	Referência

## Super-índices

$co$	Construção
$ch$	Química
$de$	Descarte
$dir$	Direto
$fi$	Formação de impacto
$ind$	Indireto
$op$	Operação
$ph$	Física
$uf$	Unidade funcional

# *Lista de Abreviaturas e Siglas*

ACV	Avaliação do ciclo de vida ( <i>Life Cycle Assessment</i> )
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AICV	Avaliação inventário do ciclo de vida
CE	Carvão energético
CEPA	Centro de socioeconomia e planejamento agrícola
CONAB	Companhia nacional de abastecimento
DAM	Drenagem ácida da mina
EDM	Efluente de drenagem da mina (águas subterrâneas)
EDR	Efluente de drenagem de retorno (águas superficiais)
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ETD	Efluente tratado e descartado
GEE	Gases de efeito estufa
<i>GWP</i>	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Inventário do ciclo de vida
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
Pt	Ponto
<i>ROM</i>	<i>Run of Mine</i>





# *Resumo*

Uma alternativa tecnológica e ambiental que vem sendo estudada há pouco mais de uma década, com o intuito de reduzir o consumo de carvão mineral, consiste em substituir uma parte do carvão por biomassa (geradora “neutra” de  $\text{CO}_2$ ) no processo de combustão combinada carvão-biomassa. Esse processo consiste na queima controlada de dois ou mais combustíveis em uma mesma fornalha e, segundo experiências previamente realizadas, principalmente, na Europa e os Estados Unidos, apresenta viabilidade técnica e econômica, e, dependendo das características dos combustíveis, pode contribuir com a mitigação de gases de efeito estufa (GEE).

A presente tese apresenta uma proposta metodológica de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoeletricas operando em combustão combinada carvão-biomassa, considerando uma fronteira estendida que compreende a usina e a rota tecnológica para a obtenção e manuseio do combustível. A propriedade exergia é indicada para a avaliação termodinâmica, e o método de avaliação do ciclo de vida (ACV) é proposto para quantificar o impacto ambiental associado, considerando a categoria de impacto mudança climática e usando o índice *Global Warming Potential* (GWP 100a ). Dois cenários foram avaliados: o cenário A, que corresponde à usina operando com 100% de carvão, e o cenário B, que corresponde à usina operando em combustão combinada, 90% de carvão e 10% de biomassa.

A rota tecnológica analisada para o caso do carvão corresponde a uma rota já estabelecida, que se localiza entre a região mineira do sul

do estado de Santa Catarina, onde predomina a mineração tradicional subterrânea, mediante a técnica de câmaras e pilares, e o complexo termoeletrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo. A informação utilizada para a análise da rota da biomassa foi obtida a partir da documentação de trabalhos realizados no complexo termoeletrico, visando o aproveitamento da biomassa residual proveniente dos cultivos do arroz próximos ao complexo, para fins energéticos.

A análise exergética mostrou que a usina termoeletrica responde pela maior parte da exergia destruída e pelo maior impacto gerado associado à categoria de impacto analisada. A partir destes resultados, foi realizada uma análise exergoambiental para o ciclo termodinâmico representativo da usina. Os resultados mostraram que o gerador de vapor constitui o equipamento com maior potencial de melhoria. Finalmente, foi proposto um fator exergoambiental global, utilizado para comparar o impacto exergoambiental do processo de geração termoeletrica nos dois cenários, em relação a um caso correspondente a uma máquina térmica ideal. O indicador exergoambiental mostrou que há melhoria de 11% no cenário B, sem levar em consideração a decomposição microbiana da biomassa na lavoura, e de até 35%, se for considerada a não decomposição da mesma, como estabelecido neste trabalho, com relação ao cenário A.

# *Abstract*

A technological and environmental alternative has been studied for about a decade to reduce the consumption of coal. It consists of substitute one part of the coal by biomass (neutral generated of CO<sub>2</sub>) in a co-firing process. The co-firing process consists of the controlled combustion of two or more fuels in the same burner. According to research performed in the US and Europe this process has economic and technical viability. And depending on the characteristics of the fuel, this process can contribute reducing the greenhouse gases (GHG).

This thesis presents a methodological proposal to analyze and evaluate a thermoelectric power plant from the exergoenvironmental point of view, operating in co-firing process and using coal and biomass. The boundary of the problem is composed by the power plant and the technological paths to obtain and manipulate the fuels. Exergy is used in the thermodynamic analysis and the life cycle assessment method is proposed to quantify the environmental impact. The climate change category was used following the global warming potential index. Two scenarios were evaluated: scenario A corresponds to the power plant operating with 100% coal and scenario B corresponds to the power plant operating in co-firing with 90% of coal and 10% of biomass.

The technological route used for the coal is established between the southern mineral region of the state of Santa Catarina and the Jorge Lacerda thermoelectric power plant complex, which is located at Capivari de Baixo. The information utilized for the biomass path was obtained from the research performed in the thermoelectric power

plant complex. The purpose of this task was to use the biomass from the rice farms as fuel.

The analysis showed that the power plant is largely responsible for exergy destruction. moreover it has the largest generated impact associated with the analyzed category. From these results, an exergoenvironmental analysis for the representative thermodynamic cycle was performed. The results showed that the boiler constitutes the equipment with the largest potential of improvement. Finally, an exergoenvironmental global index was proposed to compare the exergoenvironmental impact of the thermoelectric generation process for both scenarios, which were compared with Carnot cycle scenario. The exergoenvironmental global index showed that 11% improvement is possible for the scenario B when compared with scenario A without taking in account the biomass microbial decomposition and up to the 35% when the decomposition was considered.

# 1 *Introdução*

No capítulo introdutório, o tema abordado nesta tese será contextualizado e justificado, e os objetivos gerais e específicos serão definidos. Igualmente, serão apontadas as contribuições pretendidas e a estrutura geral da pesquisa desenvolvida.

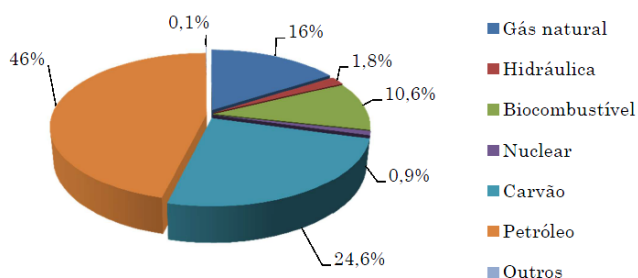
## 1.1 Contextualização do problema

Desde o final do século passado, a intensificação da atividade humana e o forte crescimento industrial causaram maior dependência de fontes energéticas convencionais. O fornecimento de energias primárias no mundo, representadas principalmente por petróleo, carvão e gás, cresceu substancialmente nas últimas quatro décadas, passando de 6.000 Mtep<sup>1</sup>, em 1973, para mais de 12.000 Mtep, em 2009 (IEA, 2011). A utilização de fontes derivadas do petróleo em processos de conversão de energia foi acompanhada por avanços teóricos de áreas relacionadas, dentre as quais, destaca-se a área da termodinâmica, que, a partir da primeira e segunda lei, teve papel importante no aperfeiçoamento contínuo de processos tecnológicos e equipamentos. No entanto, esses avanços não têm sido suficientes para alcançar uma condição de operação que considere além da utilização da fonte energética, o impacto ambiental ligado ao processo. Apesar de serem ainda prematuras, atualmente, existem hipóteses que relacionam o aumento na concentração de gases na atmosfera terrestre, como o caso do CO<sub>2</sub> e do CH<sub>4</sub>, com o fenômeno conhecido como aquecimento global. Tendo em vista essas hipóteses, no final do século passado, surgiram políticas decorrentes de tratados, como o de Kioto e de Montreal, com o objetivo de man-

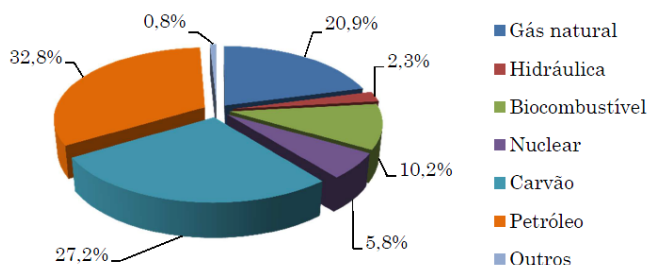
---

<sup>1</sup> Milhões de toneladas equivalentes de petróleo

ter a concentração desses gases na atmosfera em níveis aceitáveis, incentivando maior participação de energias renováveis na matriz energética mundial. No entanto, a participação percentual de fontes convencionais de energia tem permanecido quase invariável, conforme indicado na Figura 1.1. Com base nisso, supõe-se que a participação energética dessas fontes seguirá a mesma tendência nos próximos anos e, com isso, a contínua liberação das emissões associadas, como do gás  $\text{CO}_2$ , que vem ganhando destaque nas discussões sobre o fenômeno de aquecimento global, considerando sua alta taxa de emissão no processo de combustão.



(a) Energias primárias em 1973. Total 6.111 Mtep.



(b) Energias primárias em 2009. Total 12.150 Mtep..

Figura 1.1 – Matriz energética mundial.

A Figura 1.2 mostra a oferta de energia elétrica no Brasil, de acordo com a fonte. Entre as fontes indicadas, nota-se a ampla participação dos recursos renováveis, destacando-se a fonte hidráulica, representando 74% do total da oferta, e a biomassa, correspondendo a 4,7%, procedente, sobretudo, de lenha e bagaço de cana MME (2011).

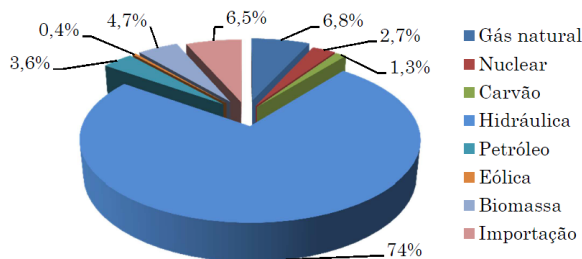


Figura 1.2 – Oferta de energia elétrica no Brasil.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, no ano de 2010, a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica no Brasil alcançou 113.327 MW, sendo que as usinas termoeletricas respondem por 26,2% desse total. Apesar de o carvão apresentar uma alta taxa de emissão de  $\text{CO}_2$ , uma parte importante das termoeletricas o utiliza como combustível base, considerando a estabilidade no subministro e o custo entre outras possibilidades tecnicamente viáveis, oferecidas no mercado internacional.

Uma das alternativas tecnológicas que vem sendo estudada há mais de uma década, tendo em vista a redução do consumo de carvão, consiste em substituir uma parcela do carvão por biomassa residual, proveniente de culturas tradicionais, como de soja, arroz, milho, entre outras, no processo denominado combustão combinada (*co-firing* em inglês). Este processo consiste na queima controlada de dois combustíveis em uma mesma fornalha, e, segundo experiências realizadas em usinas termoeletricas, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, além de apresentar viabilidade técnica e econômica, dependendo das características dos combustíveis, pode contribuir na redução de gases de efeito estufa (GEE), principalmente do  $\text{CO}_2$ , que não é emitido durante a combustão da parcela de carvão mineral substituído, e do  $\text{CH}_4$ , que é evitado devido a ausência de decomposição microbiana da biomassa nas lavouras.

### 1.1.1 Motivação

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho é a possibilidade de sistematizar a análise do processo de geração ter-

moelétrica, visando dois aspectos: um relacionado ao desempenho termodinâmico do sistema e outro ao desempenho ambiental, em relação à categoria de impacto de mudança climática. Essa sistematização da análise seguiu uma proposta metodológica que permitisse avaliar o processo de conversão na usina, e os processos nas rotas de obtenção, e o manuseio do combustível desde a fonte do recurso. Também motivou este estudo a possibilidade de avaliar a proposta metodológica a partir de um caso real de operação em uma usina termoeletrica em que pôde-se observar dois cenários: um que corresponde à operação da usina com 100% carvão, denominado cenário A, e outro que correspondente à operação em combustão combinada com 90% de carvão e 10% de biomassa em base energética, denominado cenário B.

Para o caso do Brasil, é importante considerar dois aspectos na avaliação de iniciativas de desenvolvimento tecnológico ligados à geração termoeletrica operando em combustão combinada. O primeiro é que, dos 26,2% de energia gerada pelas termoeletricas, uma percentagem provém de usinas que empregam o carvão como combustível base. O segundo aspecto está relacionado à participação da biomassa na matriz energética brasileira. Há importante participação de produtos oriundos da cana, da lenha e do carvão vegetal, mas produtos agrícolas provenientes das culturas de arroz, soja, milho e café, dentre outros, não têm, ainda, alta participação no uso da biomassa residual. É importante ressaltar que o Brasil é um país de alta produção agrícola, o que garante quantidade suficiente para o recurso energético com esses tipos de biomassa.

Na literatura, encontram-se vários estudos que se propõem analisar sistemas de conversão de energia, combinando a propriedade exergia com aspectos ambientais. No entanto, o número de experiências reportadas em relação à avaliação exergética e ambiental do processo de geração termoeletrica operando em combustão combinada, considerando a rota tecnológica de obtenção e manuseio dos combustíveis envolvidos, é ainda incipiente. Esse fato também motivou o desenvolvimento deste estudo, considerando as características dos dois cenários analisados e o potencial que a biomassa residual representa.

O trabalho considerou uma fronteira estendida desde a fonte do recurso até a usina e foi dividido em quatro etapas, cada uma subdividida em vários processos, conforme indicado na Figura 1.3. A primeira etapa corresponde à exploração mineral para a obtenção do carvão e ao trabalho na lavoura, durante a coleta da biomassa. A segunda envolve



o transporte de ambos os combustíveis até a usina. Na terceira etapa, é analisado o processamento (pré-combustão) do carvão e da biomassa. Finalmente, a última etapa consiste na análise do processo de conversão final, que acontece no ciclo térmico.

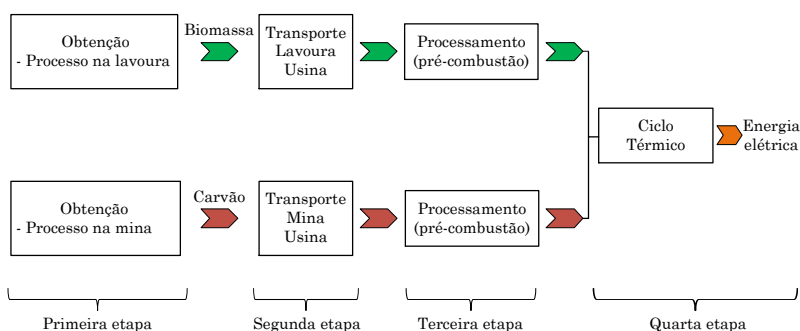


Figura 1.3 – Fronteira definida para a pesquisa.

Cabe observar que, desde a fonte do recurso - a mina, no caso do carvão, e a lavoura, no caso da biomassa - até a entrada dos queimadores do gerador de vapor, existem diversas “rotas” tecnológicas que podem ser exploradas e que dependem de aspectos relacionados tanto às características do recurso como ao transporte e uso final.

Para o caso do carvão, será analisada uma rota tecnológica já existente, que se localiza entre a região mineira do sul do estado de Santa Catarina, onde predomina a mineração tradicional subterrânea mediante a técnica de câmaras e pilares, e o complexo termoeletrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo. Para o caso da biomassa, a rota ainda não está plenamente constituída e a informação utilizada para a análise foi obtida a partir de trabalhos realizados pelo complexo termoeletrico sobre o aproveitamento da biomassa residual, com fins energéticos, proveniente dos cultivos do arroz localizados nas proximidades do complexo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é propor e avaliar uma metodologia de análise exergética e ambiental para plantas termoeletricas, operando em combustão combinada carvão - biomassa, considerando uma fronteira estendida que abrange a usina termoeletrica e os processos envolvidos nas rotas tecnologicas para a obtenção e manuseio dos combustiveis.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Tendo em vista o objetivo geral definido anteriormente, os objetivos específicos deste estudo são:

1. Realizar uma análise exergética e de impacto ambiental, considerando a categoria de impacto mudança climática associada aos processos presentes:
  - na rota de obtenção e manuseio do carvão;
  - na rota de obtenção e manuseio da biomassa;
  - numa planta termoeletrica existente de 50 MWe, considerando a condição de operação nominal 100% carvão;
  - numa planta termoeletrica existente de 50 MWe, considerando a condição de operação em combustão combinada;
2. Estabelecer um indicador de impacto exergoambiental que considere a proporção de biomassa participante no processo, em relação à categoria de impacto mudança climática;
3. Sistematizar uma proposta metodológica de análise exergética e ambiental para o processo de geração termoeletrica.

## 1.3 Contribuições pretendidas

Este trabalho visa contribuir para a sistematização de uma metodologia de análise exergética e ambiental no processo de geração termoeletrica, considerando indicadores de desempenho que, além de levar

em conta aspectos surgidos a partir das leis da termodinâmica, considerem aspectos ambientais que sirvam de ponto de partida para o melhoramento do processo.

## 1.4 Organização da tese

Este trabalho está organizado em cinco capítulos e cinco apêndices. O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica que envolve a temática abordada, sendo feita uma breve resenha histórica do desenvolvimento da termodinâmica até a propriedade exergia. Nesse capítulo, também são descritas as quatro fases da metodologia de análise de ciclo de vida (LCA), que servem de base para a análise ambiental realizada em seguida, e é definido o processo de combustão combinada, a partir de alguns trabalhos pioneiros. O Capítulo 3 apresenta a proposta metodológica, constituída de cinco passos, para a avaliação termodinâmica e ambiental de uma usina termoeletrica, considerando uma fronteira estendida que compreende a usina e a rota tecnológica para a obtenção e manuseio do combustível. A propriedade exergia é indicada para a avaliação termodinâmica e o método de avaliação do ciclo de vida (ACV) é proposto para quantificar o impacto ambiental. O Capítulo 4 trata da análise geral do processo de geração termoeletrica, seguindo os três primeiros passos da proposta metodológica e considerando os dois cenários de interesse. Para isso, é usada a estrutura existente de uma usina de 50 MWe nominais, pertencente ao complexo termoeletrico Jorge Lacerda, projetada para queimar carvão pulverizado e adaptada para operar em combustão combinada. No Capítulo 5, é realizada a análise exergoambiental da usina termoeletrica, tendo em vista os passos 4 e 5 da proposta metodológica, apresentada no Capítulo 3. No Capítulo 6 são feitas as considerações finais e são sugeridos direcionamentos para trabalhos futuros.

Em relação aos apêndices, o Apêndice A apresenta as informações referentes aos equipamentos e consumos da rota do carvão. O Apêndice B mostra dados dos equipamentos e consumos da rota da biomassa. O Apêndice C apresenta o sistema de equações do modelo desenvolvido para a análise do ciclo representativo da usina termoeletrica. O Apêndice D, mostra os resultados obtidos a partir do inventário de ciclo de vida levantado durante a realização da tese, para a categoria de impacto acidificação. Finalmente, o Apêndice E mostra o modelo de combustão desenvolvido com o CEA mediante equilíbrio químico.



## 2 *Revisão bibliográfica*

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a propriedade exergia e mostra como essa propriedade tem sido utilizada em várias propostas metodológicas que visam à quantificação do impacto ambiental associado a um processo de conversão de energia. São apresentados ainda tópicos abordados durante a pesquisa, como o método de avaliação do ciclo de vida (ACV) e o processo de geração termoeletrônica operando em combustão combinada.

### 2.1 *Resenha histórica*

A termodinâmica é uma ciência que consiste basicamente de quatro leis e um postulado, reconhecido como postulado de estado, que possibilitam entender fenômenos relacionados à matéria e sua interação com o entorno. A primeira e segunda lei da termodinâmica tem contribuído consideravelmente para o desenvolvimento tecnológico atual. Uma das primeiras contribuições para o entendimento da termodinâmica foi dada por Julius Van Mayer<sup>1</sup> (1814-1879), que realizou um estudo sobre o equivalente mecânico do calor. Contudo, as bases para o princípio de conservação da energia somente foram formalizadas a partir do trabalho de James Joule (1818-1889). O trabalho de Sadi Carnot (1796 - 1832) apresentado em 1824 e que formulou a quantidade máxima de trabalho que pode ser obtida a partir de uma quantidade determinada de calor,

---

<sup>1</sup>Médico e físico alemão nascido em Heilbronn (Wurttemberg). Em 1841, publicou seu trabalho intitulado “*On the Quantitative and Qualitative Determination of Forces*”, que, embora não tenha recebido devido reconhecimento pela comunidade científica, na época, tornou-o pioneiro na formulação do princípio da equivalência entre trabalho mecânico e energia térmica, do qual deriva o primeiro princípio da termodinâmica (princípio da conservação de energia).

constitui a base fundamental da segunda lei da termodinâmica. Contribuíram também para a formulação da segunda lei da termodinâmica, os trabalhos de Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822 - 1888), especialmente o estudo sobre a teoria mecânica do calor apresentada em 1850 e a formulação do termo Entropia, proposta, pela primeira vez da seguinte forma:

[...] posto que sou da opinião de que os nomes de quantidades deste tipo - tão importantes para a ciência - devem-se extrair de linguagens antigas com o fim de introduzi-los sem modificações nas linguagens modernas, proponho [...] o nome de Entropia [...] partindo da palavra grega *tropé* que significa transformação. Intencionalmente formei o termo entropia de maneira tal que fique o mais parecido possível ao termo energia: em efeito, ambas as quantidades estão estritamente ligadas desde o ponto de vista do significado físico que me parece útil certa analogia em seus nomes. Fonte: Silvestrini (2000).

Igualmente importante é a contribuição de William Thomson (Lord Kelvin), que em 1851 estudou sobre os preceitos apresentados originalmente por Sadi Carnot sobre perda de energia mecânica. Em 1852, Thomson publicou o trabalho intitulado “Sobre uma tendência universal na natureza para a dissipação da energia mecânica”<sup>2</sup>, no qual ele esboça os rudimentos da segunda lei da termodinâmica, baseando-se na visão de que o movimento mecânico e a energia usada para criar este movimento tende a dissipar-se ou decair, naturalmente. Em 1879, M. Plank apresentou seu trabalho relacionada ao segundo teorema fundamental da teoria mecânica do calor. Já o conceito de “trabalho máximo” foi introduzido a partir do trabalho de J. W. Gibbs (1839-1903), que utilizou o termo “energia disponível”, conduzindo, desse modo, à formulação matemática da segunda lei da termodinâmica. Assim, concluiu que o trabalho que pode ser obtido a partir de uma máquina térmica é sempre menor do que o trabalho máximo devido as irreversibilidades que acompanham os processos naturais. Em 1889, Gouy apresenta o trabalho “*Sur L’énergie utilisable*”, que mostra que essa perda de trabalho corresponde ao produto entre a entropia gerada e a temperatura do ambiente. Esse achado foi também atribuído a A. Stodola, em 1910, dando origem ao teorema ou lei de Gouy-Stodola.

---

<sup>2</sup>Em inglês “*On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy*”

## 2.2 A propriedade exergia

O termo exergia foi proposto em 1953 por Z. Rant (1904-1972). Por definição, a exergia é o máximo trabalho teórico útil (trabalho de eixo ou elétrico) que pode ser obtido de um sistema termodinâmico como resultado de condições de não equilíbrio em relação a alguma condição de referência (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996).

A energia possui quantidade e qualidade. Assim, para o caso do calor, por exemplo, a qualidade desta forma de energia depende da temperatura da fonte de calor, isto é, quanto mais alta for a temperatura da fonte em relação ao entorno imediato, maior será a proporção desta energia “calor”, que pode ser convertida em trabalho útil. Ao contrário da energia, a exergia não segue o princípio de conservação. Todo processo natural é irreversível, o que origina geração de entropia e, portanto, perda ou destruição de exergia e, conseqüentemente, ocasiona redução nos efeitos úteis do processo e aumento do consumo energético de qualquer fonte energética derivada. Dessa forma, o objetivo de uma análise exergética é detectar e avaliar quantitativamente a causa das imperfeições de um processo.

Desconsiderando efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e de interface, Szargut, Morris e Steward (1988) propõem que a exergia de uma corrente de fluido pode ser expressada como uma soma da exergia física, química, cinética e potencial, como indicado na Figura 2.1.

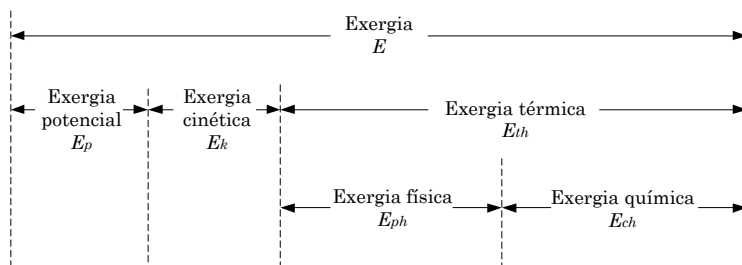


Figura 2.1 – Componentes da exergia de corrente.

Fonte: Adaptado de (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988).

Cornelissen (1997) mostra três definições da eficiência exergética para processos em regime permanente. Nesta tese, é considerada a

eficiência como definida por Kotas (1995) e denominada eficiência racional, a qual expressa o quociente entre a exergia desejada saindo do sistema e a exergia usada.

## 2.3 Avaliação do ciclo de vida

Todo processo produtivo tem por base a utilização de algum recurso natural e de algum portador energético. A utilização de ambos implica a geração de um impacto ambiental normalmente representado por emissões à atmosfera e descargas ao solo ou a corpos de água. Com base nesta preocupação, têm surgido algumas propostas metodológicas visando à quantificação desses impactos ambientais, entre os quais pode-se destacar a avaliação do desempenho ambiental e as auditorias ambientais entre outras. Uma técnica com um objetivo similar é a avaliação do ciclo de vida (ACV), que, no Brasil, segue as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044. Segundo a ABNT14040 (2009), a avaliação do ciclo de vida pode subsidiar, por um lado, a identificação de oportunidades para a melhora do desempenho ambiental de um produto em diversos pontos de seu ciclo de vida e, por outro, a seleção de indicadores de desempenho.

A filosofia detrás do método de avaliação do ciclo de vida é considerar e quantificar o impacto ambiental presente durante todos os estágios que acompanham um produto, desde a extração e aquisição de matérias primas para sua conformação (incluindo portadores energéticos consumidos), durante sua vida útil, até a disposição final. O método de avaliação do ciclo de vida é uma abordagem sistemática e estruturada em torno de uma unidade funcional cujo propósito é fornecer uma referência para as entradas e saídas. O método de avaliação do ciclo de vida consiste em quatro fases:

1. fase de definição de objetivo e escopo, a qual dependerá do grau de detalhamento e do tempo de duração do estudo;
2. fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV), que corresponde ao inventário dos dados de entrada e saída (fluxos de insumos e de energia) associados ao sistema em estudo e em função da unidade funcional definida;
3. fase de avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV), a qual fornece informação sobre o impacto em função do inventário de



ciclo de vida previamente elaborado, em relação às categorias de impacto analisadas. Para cada categoria, é selecionado um indicador de categoria de impacto de ciclo de vida (indicador de categoria) e é calculado o resultado desse indicador. O conjunto dos resultados dos indicadores fornece informações sobre as questões ambientais associadas às entradas e saídas do sistema definido na fronteira;

4. fase de interpretação dos resultados obtidos durante o estudo.

A norma ABNT NBR ISO 14040 propõe modelar o ciclo de vida de um produto por meio de seu sistema de produto<sup>3</sup>. Os sistemas de produto são compostos por processos elementares ligados uns aos outros através de fluxos de produtos intermediários (podendo ser resíduos para tratamento) ou de fluxos elementares<sup>4</sup> do meio ambiente. A Figura 2.2 mostra os fluxos anteriormente mencionados.

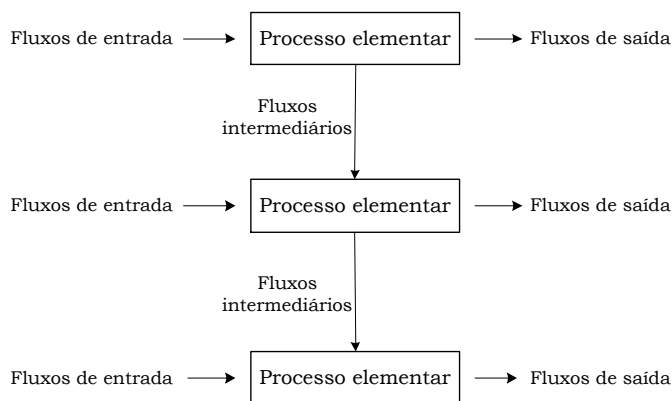


Figura 2.2 – Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto.

<sup>3</sup>Conjunto de processo elementares, com fluxos elementares e de produto, que desempenha uma ou mais funções definidas e modela o ciclo de vida de um produto.

<sup>4</sup>Corresponde ao material, ou energia, retirado do meio ambiente que entra no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou ao material que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana.

Três trabalhos relacionados aos sistemas de conversão de energia que utilizam o método ACV podem ser citados. O primeiro é o estudo realizado por Hondo (2005), que mostra os resultados da análise do ciclo de vida de nove sistemas de geração de potência elétrica para caracterizar o tipo de tecnologia do ponto de vista do fenômeno de aquecimento global. Para realizar a análise, utilizou-se como índice o fator de ciclo de vida da emissão de gases de efeito estufa, que corresponde a um quociente que relaciona as emissões indiretas associadas aos três estágios do ciclo de vida (construção, operação e descarte) e a emissão direta do processo de combustão durante operação. A proposta utiliza o índice *GWP* para transformar a contribuição de cada gás em seu  $\text{CO}_2$  equivalente. Para o caso de tecnologia de geração a carvão, os resultados mostraram um indicador de 975 kg de  $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ /MWh, dos quais cerca de 94% corresponde a emissões diretas durante operação da usina.

Outro trabalho é o realizado recentemente por Odeh e Cockerill (2008). O estudo examinou o ciclo de vida de uma planta térmica a carvão no Reino Unido, observando gases de efeito estufa e considerando uma fronteira estendida que inclui os processos na mina do carvão. A análise mostrou um indicador de 990 kg de  $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ /MWh, dos quais 89% provém da emissão direta do carvão durante o processo de combustão.

O terceiro trabalho relacionado aos sistemas de conversão de energia foi realizado nos Estados Unidos, por Spath, Mann e Kerr (1999). Os autores analisaram o ciclo de vida de uma planta térmica hipotética a carvão. O estudo centrou-se nos três maiores gases de efeito estufa - ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) Os resultados mostraram um valor de 1.042 kg de  $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ /MWh e foi concluído que a operação da planta responde por 95% do total das emissões. A Tabela 2.1 resume os resultados dos trabalhos citados anteriormente.

### 2.3.1 Análise de sistemas termodinâmicos

Há algumas décadas, vêm sendo apresentadas propostas metodológicas para a avaliação de sistemas de conversão de energia que, além da propriedade exergia, consideram outros aspectos relacionados a análises econômicas e ambientais. Assim como a exergoeconomia se sustenta no fato de que a propriedade exergia é a única base racional para carregar custos à interação entre um sistema e seu entorno,

Tabela 2.1 – Emissões de GEE de plantas de geração termoeétrica a carvão.

	Hondo (2005)	Odeh (2008)	Spath (1999)
País	Japão	Reino Unido	Estados Unidos
Eficiência (%)	36,8	35	32
Total	975,2	989,7	1.042
(CO <sub>2</sub> -eq/MWh)			
Usina (%)	91,6	89,1	95,1
Transporte (%)	1,6	-	1,7
Mineração (%)	6,4	10,8 <sup>a</sup>	2,7
Construção (%)	0,4	0,1	0,5

<sup>a</sup>inclui o transporte e metano emitido durante o processo.

a análise exergoambiental reconhece na mesma propriedade o vínculo entre energia e o meio ambiente. Diferentes aproximações vêm sendo sugeridas para combinar o conceito de exergia e de avaliação ambiental. A ideia fundamental consiste em tentar quantificar, a partir de algum método, o impacto ambiental associado ao processo em estudo e relacioná-lo com os fluxos de exergia previamente identificados. Atualmente, o método mais utilizado é o de avaliação de ciclo de vida<sup>5</sup> (ACV). Assim, o impacto ligado ao processo é quantificado a partir de um determinado indicador, o qual está relacionado à categoria de impacto de interesse.

Frangopoulos e Caralis (1997) propõem um método que considera o impacto ambiental na avaliação econômica de um sistema de conversão de energia ao envolver, no custo total, o custo ambiental e social. A metodologia é construída a partir de duas questões: como calcular o custo externo da produção de eletricidade (custo externo = custo social + custo ambiental) e como conseguir abordar metodologicamente o problema para que os custos fiquem imersos na avaliação dos sistemas térmicos.

Cornelissen (1997) mostra que a análise exergética é um instrumento que pode ser relacionado ao conceito de desenvolvimento sustentável, já que, mediante dita análise, são identificadas as irreversibi-

<sup>5</sup>Em inglês *Life Cycle Assessment (LCA)*. Esse método é internacionalmente aceito e reconhecido para a avaliação do impacto ambiental associado a produtos ou processos, considerando todas as etapas do ciclo de vida.

lidades de um processo relacionadas ao uso de energias não renováveis. A partir disso, o autor apresenta uma extensão do método ACV no método *ELCA*<sup>6</sup>.

Também Sciubba (2001) apresenta uma metodologia de análise e avaliação de sistemas de conversão de energia, baseada na propriedade exergia. A proposta é uma tentativa sistemática de integrar o conceito proposto por Szargut, denominado consumo acumulativo de exergia (*CExC*<sup>7</sup>), com o método termoeconômico. O método permite a comparação direta entre quantidades não energéticas, como é o caso do impacto ambiental.

Conforme apontam Szargut, Ziebig e Stanek (2002), o esgotamento dos recursos renováveis é um tema fundamental para o futuro da humanidade e, dessa forma, a atenuação desse esgotamento representaria uma ferramenta para a proteção do meio ambiente. Tendo em vista que a exergia é considerada uma medida da qualidade do recurso natural, o consumo acumulativo de exergia (*CExC*), juntamente com aspectos econômicos relacionados ao processo, pode ser aceito como uma medida do esgotamento do recurso natural não renovável. Essa quantidade é chamada de custo ecológico do produto ou processo. O custo ecológico é expresso por unidade de energia ou de exergia. A valoração do custo exergético pode ser determinada por meio de um grupo de equações lineares de entrada e saída, similares às propostas pelo método *CExC*.

O estudo de González *et al.* (2003) apresenta duas propostas para a localização de cargas ambientais numa planta de cogeração, baseando-se em resultados obtidos de uma análise exergoeconômica. A primeira proposta considera o custo exergético como o parâmetro mais adequado para a alocação das cargas ambientais. Os autores concluem que, no caso onde há mais de uma câmara de combustão, ou mais de um combustível, o resultado não é totalmente adequado, dado que a metodologia considera o mesmo peso para a emissão de contaminante por unidade de exergia do combustível queimado em cada uma das câmaras. A segunda proposta introduz vetores ambientais aos fluxos de exergia para obter melhor distribuição da carga ambiental. A proposta se baseia em três proposições: a primeira considera o custo exergoambiental como uma propriedade conservativa; a segunda considera que o custo exergoambiental por unidade de fluxo de exergia saindo de um determinado sistema deve ser igual aos fluxos que entram no mesmo, e a

---

<sup>6</sup>Em inglês *Exergetic Life Cycle Analysis*.

<sup>7</sup>Em inglês *Cumulative Exergy Consumption*.

última considera que todos os componentes envolvidos em um subsistema apresentam o mesmo custo exergoambiental unitário.

Lombardi (2003) apresenta a avaliação do ciclo de vida em três plantas de baixa emissão de carbono. O principal interesse do estudo está na geração de CO<sub>2</sub> durante os períodos consideradas pelo ciclo de vida (construção, operação e descarte da planta). Vários critérios de comparação com respeito à mitigação do CO<sub>2</sub> foram analisados, entre eles a eficiência energética e a avaliação econômica. Os resultados indicaram que a avaliação do ciclo de vida foi selecionada como o critério de comparação mais apropriado.

Pellegrini e Oliveira (2009) propõem dois aspectos a serem considerados na discussão sobre o conceito de renovabilidade de um produto. O primeiro é a origem da fonte, e o segundo a eficiência dos processos de conversão de energia, o que envolve os fluxos de exergia associados, de um lado, aos produtos derivados de um determinado processo e, de outro, aos fluxos associados à exergia destruída de ativação relacionada aos resíduos e às emissões contaminantes que são expulsas ao exterior.

Mais recentemente, Meyer *et al.* (2009) apresentaram uma proposta metodológica para a avaliação do impacto ambiental de sistemas de conversão de energia. A proposta é baseada em três passos: o primeiro consiste em realizar uma análise exérgica do sistema em estudo; o segundo consiste em quantificar o valor do impacto ambiental fazendo uso do método ACV em conjunto com o Eco-indicator 99, e o último corresponde ao impacto ambiental associado aos componentes, sendo atribuído aos fluxos de exergia de cada um deles. É importante destacar que a metodologia apresenta um paralelo com a proposta de análise exergoeconômica indicada por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) e propõe cinco variáveis para a avaliação de cada componente:

- Impacto ambiental específico da fonte ( $b_{f,n}$ );
- Impacto ambiental específico do produto ( $b_{p,n}$ );
- Impacto ambiental associado à exergia destruída ( $B_{D,n}$ );
- Diferença relativa do impacto específico ambiental ( $r_{b,n}$ );
- Fator exergoambiental ( $f_{b,n}$ ).

Portha *et al.* (2010) realizaram uma análise do impacto ambiental de um processo petroquímico, utilizando em conjunto a ACV e a análise

exergética. O desafio consistiu em determinar a possível relação que há entre o balanço termodinâmico aplicado ao sistema previamente definido, e a emissão de gases de efeito estufa ao longo do tempo correspondente ao ciclo de vida. Como o foco estava em mudanças climáticas, o indicador utilizado é o potencial de aquecimento global ( $GWP^8$ ). Além disso, Boyano *et al.* (2011) apresentam resultados da análise exergo-ambiental de um sistema transformador de metano com vapor de água  $SMR^9$  para a produção de hidrogênio, visando quantificar a formação de impacto e a alocação nos componentes do sistema.

## 2.4 O processo de combustão combinada

O processo de combustão combinada consiste na queima contínua e controlada de dois ou mais combustíveis, não apresentando necessariamente as mesmas características físicas. O desenvolvimento tecnológico e a implementação desse processo na geração termoeletrica misturando carvão mineral com biomassa residual são relativamente novos. Nos últimos dez anos, países como EUA, Finlândia, Dinamarca, Alemanha, Bélgica, Holanda, Polônia entre outros, apresentaram um importante progresso a partir de experiências relacionadas a esta tecnologia (SULLIVAN; MEIJER, 2009). A seguir, serão descritas experiências que foram consideradas exploratórias e que contribuíram para o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos envolvidos no processo. As avaliações dessas experiência conduziram ao melhoramento e à aceitação do processo de geração termoeletrica em combustão combinada como uma alternativa energética.

- Holanda (*Gelderlan power station*): o projeto consistiu na implementação do processo para aproveitar cerca de 240.000 toneladas de madeira. A unidade selecionada de 635 MWe foi adaptada ao processo e o sistema de processamento da biomassa foi projetado para uma quantidade de 60.000 mil toneladas por ano. O sistema operou com 10 t/h de pó de madeira, com granulometria entre 0,8 e 1,5 mm, o que equivale a 3 ou 4% do total de calor que entra na fornalha. A avaliação mostrou que, para essas condições

---

<sup>8</sup>Em inglês *Global Warming Potential* é uma medida relativa da quantidade de calor atrelada a um gás de efeito estufa na atmosfera, para um tempo base de 100 anos, cujo valor é de 1 para o  $CO_2$  e de 25 para o  $CH_4$ .

<sup>9</sup>Em inglês *Steam Methane Reforming*

de operação, com uma adequada qualidade no carvão, os impactos no desempenho do gerador de vapor foram muito pequenos. Apesar dos problemas apresentados inicialmente nos equipamentos utilizados para o processamento da biomassa (manipulação, moagem e pulverização), a usina operou adequadamente substituindo aproximadamente 45.000 toneladas de carvão por ano.

- Dinamarca (*Studstrup power plant*): a pesquisa foi motivada pelos 1,2 milhões de toneladas anuais de biomassa residual resultante da colheita agrícola. O projeto foi desenvolvido em uma planta de 150 MWe e operou de forma contínua, queimando carvão e biomassa entre 1996 e 1998. Uma importante contribuição do projeto foi o conhecimento adquirido sobre o sistema de recebimento, armazenagem e processamento da palha, para uma capacidade de 20 toneladas por hora, o que correspondeu a 20% do total da energia exigida pelo gerador de vapor quando a planta operava a plena carga. A avaliação durante a operação centrou-se na manipulação e no processamento da palha, no sistema de queima, no desempenho do gerador de vapor e nos processos químicos (*slagging*<sup>10</sup>, *fouling*<sup>11</sup> and *corrosion*).
- Austrália (*Wallerawang power station*): no ano 2000 a companhia *Delta electricity* instaurou o processo empregando serragem, casca de madeira e carvão na usina em questão. Os testes preliminares foram conduzidos pela Universidade de *New Castle* com o objetivo de observar o impacto do processo de geração em combustão combinada no desempenho da unidade e de identificar a melhor relação de mistura em função das emissões geradas pelo processo.

Os resultados apresentados nessas experiências exploratórias mostraram um ponto fraco relacionado à cadeia de abastecimento da biomassa, desde a fonte até a usina. A utilização da biomassa em escala industrial, com propósitos energéticos, é relativamente nova e, como consequência, não existe infra-estrutura adequada para facilitar a distribuição da biomassa, o que torna seu fornecimento limitado, gerando instabilidade econômica ao processo.

---

<sup>10</sup>Depósitos de cinzas e minerais fundidos sobre a superfície de troca de calor, formados como consequência das altas temperaturas.

<sup>11</sup>Sujeira originada pelos produtos da combustão (cinzas leves) na queima de um combustível com temperatura mais baixa que a de ponto de fusão.

Nos Estados Unidos, outros trabalhos são reportados pelo *Electric Power Institute (EPRI)*, que realizou estudos visando a viabilidade do processo de geração em combustão combinada em mais de 15 plantas geradoras com carvão como combustível base e gerador de vapor com fornalha tipo ciclônica. A pesquisa observou a armazenagem e o aquecimento da mistura carvão- biomassa, a amostragem e a análise química de pelo menos 60 fontes de biomassa residual, incluindo a palha e o pó de madeira, correspondendo de 6 a 10% da mistura, dependendo do tamanho da partícula e do impacto do processo na capacidade e eficiência do gerador de vapor (EPRI, 1999).

Com relação à avaliação do potencial, Tillman (2000) apresenta uma análise completa das experiências exploratórias, já realizadas nos Estados Unidos, do processo de geração termoeletrica em combustão combinada. Como importante contribuição do trabalho desenvolvido, pode-se destacar as correlações empregadas na avaliação de gases poluentes, denominados de curto impacto, como o  $\text{NO}_x$  e o  $\text{SO}_x$ , e de longo impacto, associados ao efeito estufa, como o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{CH}_4$ , considerando diversos tipos de biomassa e diferentes proporções utilizadas na mistura com o combustível base.

Royo *et al.* (2005) analisaram o potencial energético que poderia ser obtido mediante a aplicação do processo de combustão combinada nas centrais termoeletricas de carvão pulverizado na Espanha. Além disso, avaliam o potencial de biomassa residual limítrofe em cada uma das centrais espanholas e compara com a quantidade máxima do recurso que poderia ser utilizado. Com os resultados obtidos, os autores realizam uma análise de viabilidade econômica de implantação desta tecnologia considerando vários cenários. O resultado foi positivo no que diz respeito ao potencial da biomassa, mas não com relação à viabilidade econômica, considerando os aspectos jurídicos e econômicos das instalações que fazem parte de regimes especiais.

Hamelinck, Suurs e Faaij (2005) propõem uma metodologia para a avaliação energética da biomassa e sua cadeia produtiva desde a fonte até a unidade de conversão final. Para os autores, a biomassa é um recurso disperso e, portanto, o algoritmo de avaliação é formado a partir de vários possíveis locais de coleta e centros de armazenagem. Para a movimentação da biomassa, o estudo considerou três possibilidades de transporte: caminhão, trem e navio, dependendo da distância e das características geográficas. Na cadeia recurso-unidade de conversão final, foram identificadas quatro etapas importantes. A primeiras cor-



respondem à produção da biomassa e ao pré-tratamento, que inclui armazenagem em centros destinados para essa finalidade, e secagem, devido aos diversos fatores, como custo do transporte, perda por decomposição e eficiência na combustão. A terceira etapa corresponde ao transporte, ressaltando a importância nos procedimentos de carga e descarga e nas tecnologias empregadas, dependendo da distância. Finalmente, a última etapa se relaciona com a unidade de conversão final. Entre as diferentes alternativas avaliadas, o foco se deu na quantidade de energia envolvida e quantidade de CO<sub>2</sub> gerado.

Hansson *et al.* (2009) avaliaram o potencial técnico para a queima de biomassa junto com o carvão na infraestrutura atual nos 27 países da comunidade econômica europeia (EU27). Para o estudo, assumiu-se que todos os geradores de vapor ativos que operam com carvão eram aptos para serem adaptados tecnologicamente ao processo de combustão combinada e que a biomassa, em termos de energia, representava 15% da energia fornecida pelo carvão, quando a tecnologia era de leito fluidizado, e até 10%, quando o gerador de vapor queimava carvão pulverizado ou em grelha. Como resultado do estudo, observou-se que a demanda de biomassa para o potencial técnico disponível é da ordem de 900 PJ/ano, para plantas com até 40 anos de operação, e de 520 PJ/ano para geradores de vapor com até 30 anos, o que corresponde a aproximadamente 10% do potencial disponível.

Pereira, Bazzo e Oliveira (2009) avaliaram o parque termo-gerador que utiliza carvão como combustível base no Brasil e compararam com as possibilidades da implementação no processo de combustão combinada analisando o potencial de biomassa residual gerada nas culturas mais representativas.

### 2.4.1 Alternativas tecnológicas

Uma das etapas mais importantes para a implementação do processo de combustão combinada consiste na manipulação e preparação da biomassa para a combustão. A Figura 2.3 mostra três possibilidades de adaptação tecnológica possíveis para a queima direta da biomassa. A primeira consiste em misturar a biomassa e o carvão antes do processo de moagem ou pulverização, ou seja, a biomassa e o carvão são submetidos aos mesmos estágios de preparação antes da queima na fornalha, conforme indicado na Figura 2.3(a). Essa opção é válida quando a biomassa, por suas características físicas, permite o mesmo tratamento

dados ao carvão para atingir a granulometria requerida na combustão. Além disso, requer pouco investimento e apresenta um bom desempenho para uma participação baixa de biomassa no processo.

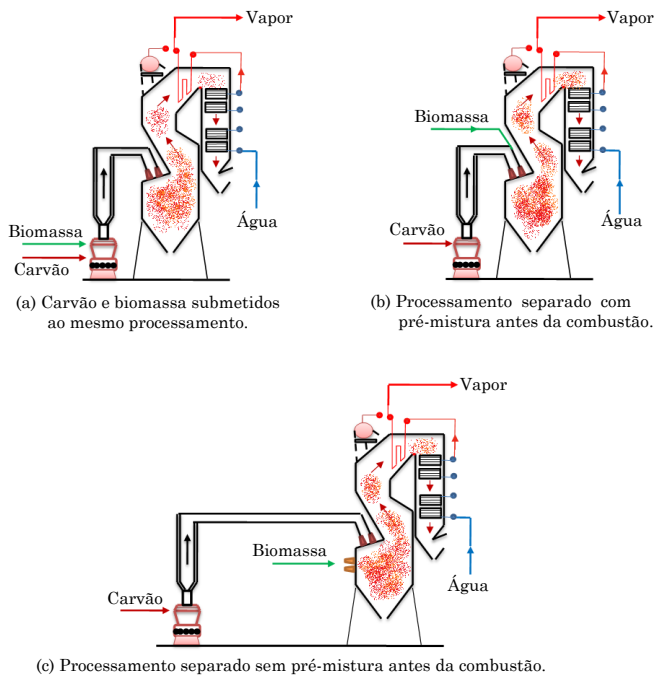


Figura 2.3 – Alternativas para a combustão combinada carvão - biomassa.

Como indicado na Figura 2.3(b), a segunda opção consiste na manipulação e no processamento da biomassa e do carvão separadamente. Ao alcançar a granulometria adequada, a biomassa é injetada na linha de transporte do carvão pulverizado, antes dos queimadores, permitindo taxas altas e melhor controle na razão da mistura. A terceira opção, como indicado na Figura 2.3(c), propõe processos independentes para o carvão e para a biomassa (KAPPEJAN, 2008). Para materializar essa possibilidade, são necessárias modificações tecnológicas no gerador de vapor e, portanto, exige maior investimento econômico. A escolha entre essas possibilidades depende das características físicas do recurso. Para o desenvolvimento desta proposta, a biomassa em

questão é palha de arroz, que, dada a sua característica fibrosa, impede seu processamento junto com o carvão, sendo, portanto definida a opção de manipulação e processamento da biomassa e do carvão separadamente, mas com queima em conjunto, como indicado na Figura 2.3(b).

### 2.4.2 Aspectos ambientais

Das atividades humanas associadas à geração de gases de efeito estufa, o setor energia é o que apresenta contribuições mais relevantes, alcançando 83% do total, conforme reportado por (IEA, 2009). Entre os gases envolvidos, o  $\text{CO}_2$  é o mais representativo, atingindo 94% do total e sendo relacionado ao setor energia. Existe uma pequena parcela de outros gases, correspondente a 5% de  $\text{CH}_4$ , que são considerados de alta agressividade, devido a sua capacidade de absorção de calor atmosférico, estimada entre 15 e 40 vezes superior à do  $\text{CO}_2$ , que provém principalmente de atividades agrícolas. O percentual relacionado ao óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$  é resultante da utilização de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas (AGOSTINETTO *et al.*, 2002).

Ao considerar a geração termoeletrônica em combustão combinada de carvão pulverizado com biomassa residual, apresentam-se dois benefícios ambientais. Por um lado, há redução nas emissões diretas de  $\text{CO}_2$ , ao substituir parte do carvão por biomassa, que pode ser considerada geradora “neutra” devido ao fato que, durante o período de crescimento, a quantidade emitida de  $\text{CO}_2$  na combustão é previamente assimilada pela planta mediante a fotossíntese (MACIEJEWSKA *et al.*, 2006). Por outro lado, a queima da biomassa residual evita a geração do  $\text{CH}_4$  pela não decomposição da biomassa nas lavouras.

É importante ressaltar que, para realizar um balanço do  $\text{CO}_2$  gerado durante o processo de geração em combustão combinada, deve-se considerar todas as etapas envolvidas, desde a coleta na lavoura até a queima da biomassa na fornalha do gerador de vapor, dado que, por consumir algum tipo de energia, constituem-se como geradores de  $\text{CO}_2$  e, portanto não podem ser desconsideradas na avaliação global do processo. A Figura 2.4, ilustra os diversos processos aos quais é submetida a biomassa antes de atingir as características granulométricas desejadas na combustão.

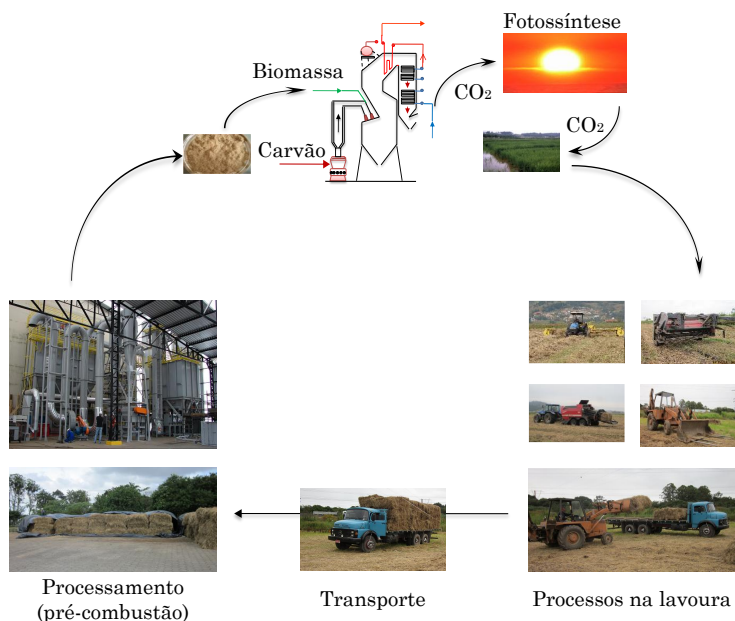


Figura 2.4 – Etapas do processamento da biomassa.

Assim como no caso da biomassa, na geração de CO<sub>2</sub> durante a combustão do carvão, é necessário acrescentar o impacto associado aos diferentes processos envolvidos, desde sua extração na mina até o momento em que o carvão atinge a boca dos queimadores na fornalha do gerador de vapor.

## 2.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada uma revisão bibliográfica do conceito de exergia e de alguns trabalhos que relacionam essa propriedade com os resultados obtidos em análises ambientais que visam a caracterização de um sistema de conversão, do ponto de vista exergético e ambiental. Igualmente, foram descritos o método de avaliação de ciclo de vida (ACV) e o processo de geração termoeletrônica operando em combustão combinada.

## 3 *Proposta metodológica*

Este capítulo apresenta, de forma sistemática, uma proposta metodológica para a avaliação termodinâmica e ambiental de uma usina termoeétrica, considerando uma fronteira estendida que consiste da usina e da rota tecnológica para a obtenção e manuseio do combustível. A propriedade exergia é indicada para a avaliação termodinâmica, enquanto o método de avaliação do ciclo de vida (ACV) é proposto para quantificar o impacto ambiental.

### 3.1 Estrutura da proposta metodológica

Do ponto de vista termodinâmico, o objetivo da análise exergética é identificar os processos nas etapas definidas na fronteira do problema com potencial de melhora, e o objetivo da avaliação ambiental é identificar o impacto associado a esses processos. Com base nesses objetivos, é apresentada a estrutura da proposta metodológica com a finalidade de sistematizar a análise exergética e ambiental do processo de geração termoeétrica, avaliando dois cenários: o cenário A, que corresponde à operação atual da usina, com 100% carvão, e o cenário B, que corresponde à operação em combustão combinada, com 90% carvão e 10% de biomassa em base energética.

A estrutura da proposta metodológica consta de duas partes. A primeira consiste em uma análise geral do problema, que permite identificar as etapas consideradas relevantes no processo de geração termoeétrica. A segunda parte consiste na análise local, seguindo uma aproximação teórica baseada na proposta de análise exergoambiental apresentada por Meyer *et al.* (2009), o que permite quantificar o impacto ambiental e associá-lo aos diferentes fluxos, assim como calcular

as variáveis exergoambientais nos componentes do sistema.

Como indicado na Figura 3.1, a estrutura consta de cinco passos, sendo os três primeiros relacionados à análise geral do problema e os dois últimos relativos à análise local das etapas com alto consumo de exergia ou com contribuição significativa de impacto ambiental.

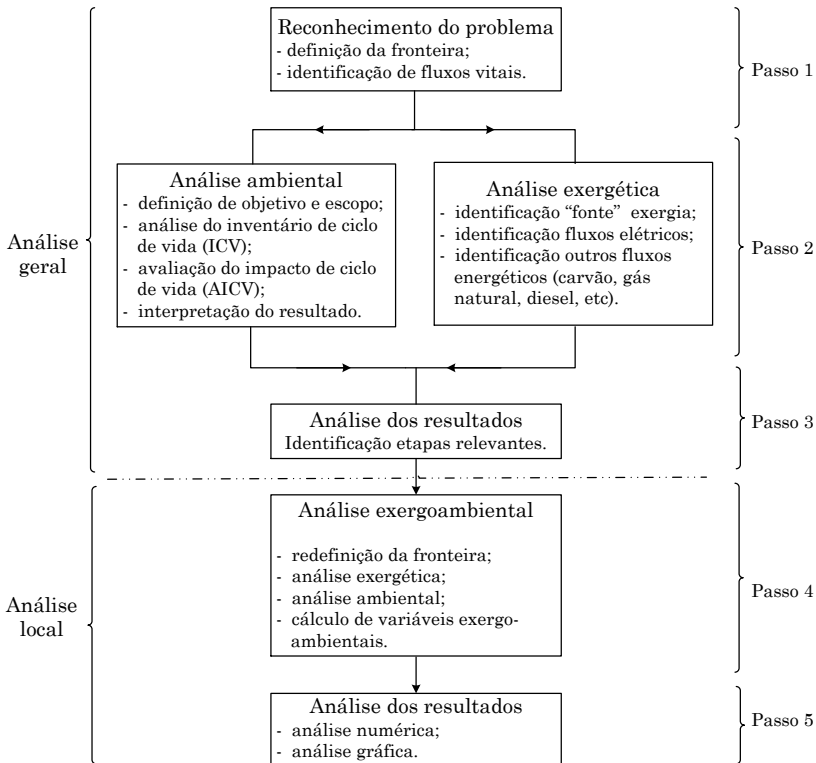


Figura 3.1 – Estrutura da proposta metodológica para a análise exergética e ambiental.

## 3.2 Análise geral do problema

A análise geral segue três passos: reconhecimento do problema, análise exergética e ambiental e identificação das etapas que, de acordo

com a avaliação feita, são relevantes. Esses passos são descritos a seguir.

### 3.2.1 Passo 1: Reconhecimento do problema

Para atingir o objetivo da análise exergética e ambiental, é importante ter presente que o resultado é o reflexo do modo como foi abordado o problema referente à definição da fronteira e identificação dos fluxos de massa e de energia relevantes no processo. Antes de definir o problema, é recomendável realizar um reconhecimento visual dos processos e sub-processos envolvidos, o que permite obter informação útil para a definição da fronteira e para a escolha adequada dos fluxos e dos critérios de corte<sup>1</sup>.

Uma vez definida a fronteira, e tomando como base o objetivo proposto para as análises, são identificados os processos relevantes, a exclusão de algum deles é apenas recomendado com base na experiência. Igualmente, o critério de corte adotado para os fluxos de entrada ou saída deve ser coerente com o grau de importância do fluxo material ou energético em relação ao impacto associado a dito fluxo.

O primeiro passo é finalizado com a descrição do sistema em estudo mediante um fluxograma que mostre a inter-relação existente entre fluxos, processos e sub-processos considerados vitais.

### 3.2.2 Passo 2: Análise exergética e ambiental

Tanto a análise exergética quanto a ambiental dependem da quantificação dos fluxos (massa e energia) e da identificação de sua inter-relação com os processos analisados. Por isso, definiu-se que a estrutura da proposta metodológica, indicada na Figura 3.1, é iniciada pela análise ambiental, considerando que, durante a mesma, é realizado o inventário de ciclo de vida em função da unidade funcional<sup>2</sup> identificada. Uma vez elaborado o inventário de ciclo de vida, os dados do mesmo podem ser usados para a análise geral exergética do problema.

---

<sup>1</sup>Especificação, em termos de fluxos de material ou energia ou do nível de significância ambiental associados a processos elementares ou a sistemas de produto, dos limites que definem a exclusão de dados de um estudo.

<sup>2</sup>Definido pela norma ABNT NBR ISO 14044 como o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência.

### 3.2.2.1 Análise ambiental geral

A proposta de análise ambiental aqui apresentada é uma síntese das indicações das normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, relacionadas à gestão ambiental e à avaliação do ciclo de vida. Para maior detalhamento, sugere-se consultar as normas ISO/FDIS-14040 (2006) e ISO/FDIS-14044 (2006). Conforme visto na Seção 2.3, a avaliação do ciclo de vida (ACV) é um método que tem como objetivo ajudar a identificar oportunidades para a melhora do desempenho ambiental de produtos, serviços ou processos, durante seu ciclo de vida<sup>3</sup>. A ACV é composta por quatro fases: (i) fase de definição do objetivo e do escopo; (ii) fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV); (iii) fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), e (iv) fase de interpretação dos resultados. A seguir, é dada uma descrição sucinta de cada fase.

(i) *Fase de definição de objetivo e escopo*: o objetivo e o escopo do estudo devem ser claramente definidos. O objetivo deve considerar a aplicação pretendida e as razões que motivaram a realização do estudo, enquanto o escopo deve definir de forma clara o sistema produtivo que será avaliado. Com base no reconhecimento do problema e da fronteira previamente definida (passo 1), nesta fase, são identificadas a unidade funcional, a qual fornece uma referência para a normalização dos dados de entrada e saída, e a categoria, ou categorias, de impacto, que será incluída no estudo.

(ii) *Fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV)*: para realizar a análise, primeiramente deve ser elaborado o inventário de ciclo de vida a partir da coleta de dados e da informação considerada relevante. A Figura 3.2 mostra que o procedimento para a obtenção do inventário de ciclo de vida é iterativo; inicia-se com a coleta de informações (fluxos de entrada e saída de energia, massa, produtos, co-produtos e resíduos, assim como liberações à atmosfera, à água e ao solo) e segue com a correlação dos dados com os processos e a unidade funcional até que seja obtido o inventário calculado (ABNT14044, 2009). É recomendado que a coleta de dados seja realizada durante um tempo prudencial e por medição direta. Na ausência desta possibilidade, os dados podem ser estimados a partir de informações recebidas do pessoal vinculado a ditos processos, de modelos teóricos que representem o

---

<sup>3</sup>Definido pela ABNT NBR 14040 como estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final.



processo (como, por exemplo, o modelo de combustão), ou derivados de outras fontes bibliográficas.

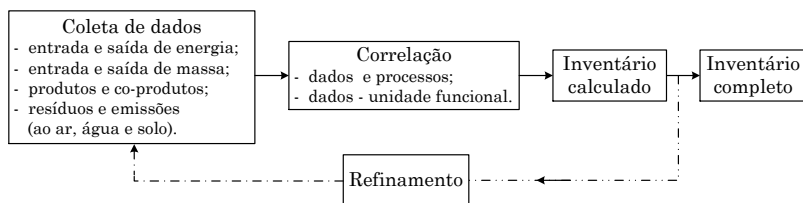


Figura 3.2 – Procedimento para elaboração do inventário do ciclo de vida.

No caso de o processo avaliado apresentar mais de um produto final, os dados considerados como relevantes para o inventário devem ser alocados<sup>4</sup> a diferentes produtos, de acordo com os critérios definidos de forma clara. Os dados de um inventário de ciclo de vida devem ser continuamente refinados, seguindo a dinâmica do processo.

(iii) *Fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)*: a avaliação do impacto é realizada com base no inventário previamente elaborado. Em primeiro lugar, é feita a seleção das categorias de impacto<sup>5</sup>, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização.

Em segundo lugar, são correlacionados os resultados do ICV com as categorias de impacto selecionadas. Finalmente, é realizado o cálculo dos indicadores de categoria, que consiste na conversão dos resultados do ICV para unidades comuns dentro da mesma categoria de impacto. Esse resultado é um valor numérico do indicador. A título de exemplo, a Tabela 3.1 mostra os termos que devem ser considerados para a avaliação de um processo ou produto para a categoria de impacto denominada acidificação (ISO/TR-14047, 2003).

(iv) *Fase de interpretação dos resultados*: os resultados das fases de ICV e AICV devem ser interpretados de acordo com o objetivo e escopo do estudo, e deve incluir uma avaliação e uma verificação de

<sup>4</sup>Repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas de produto.

<sup>5</sup>Segundo a norma ABNT NBR ISO 14044, é a classe que representa as questões ambientais relevantes e às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados. Exemplos de avaliação mediante categorias de impacto podem ser vistos em detalhe em ISO/TR-14047 (2003).

Tabela 3.1 – Termos definidos na avaliação do impacto do ciclo de vida.

Termo	
Categoria de impacto	Acidificação.
Resultado do ICV	Substâncias ácidas emitidas ao ar ou à água.
Modelo de caracterização	Eco-indicador 99 usando modelo <i>nature planner</i> <sup>a</sup>
Indicador de categoria	Incremento em $PDF^b_{vegetation}$ de espécies de plantas em áreas naturais.
Fator de caracterização	Fração do potencial de desaparecimento ( $PDF$ ) para cada emissão ácida ao ar. $SO_{2-eq}$ ou $PDF \cdot m^2 \cdot ano$ por kg de gás emitido.
Pontos finais da categoria	Biodiversidade, vegetação natural, madeira, peixes, monumentos.
Relevância ambiental	Evolução e efeitos na vegetação natural.

<sup>a</sup>*Tool of the Netherland Environmental Assessment Agency.*

<sup>b</sup>*Potentially Disappeared Fraction.*

sensibilidade em relação às questões significativas, isto é, aos dados do inventário (massa, energia, emissões, descargas, resíduos, etc), às categoria de impacto analisadas, aos indicadores de categoria e aos modelos selecionados. Nesta fase, é importante também ter presente os métodos utilizados e os pressupostos adotados nas fases precedentes, tais como regras de alocação e critérios de corte.

### 3.2.2.2 Análise exergética geral

A análise exergética geral visa identificar e quantificar os fluxos de exergia associados às etapas consideradas na fronteira do problema, e com isso, o potencial de melhora em ditas etapas. A exergia associada aos fluxos de massa e energia identificados como relevantes é calculada a partir do inventário de ciclo de vida previamente elaborado e seguindo as pautas dadas a seguir.

(i) *Identificação do início do processo de conversão*: do ponto de vista exergético, é importante identificar qual é o ponto inicial do processo, ou seja, o ponto de partida para o cálculo da eficiência global e da exergia consumida nos processos associados às diferentes etapas que

fazem parte da fronteira do sistema.

Para o caso do processo de geração termoelétrica, o ponto sugerido como inicial ou de “fonte exergética” ( $\dot{E}_{fonte}$ ), é localizado na entrada dos queimadores do gerador de vapor e corresponde à exergia química do combustível utilizado. O cálculo desta quantidade é feito mediante a Equação 3.1.

$$\dot{E}_{fonte} = e_{comb}^{ch} \dot{m}_{comb} \quad (3.1)$$

A exergia química específica  $e_{comb}^{ch}$  é calculada a partir da correlação sugerida por Szargut, Morris e Steward (1988), conforme indicado na Equação 3.2.

$$e_{comb}^{ch} = (PCI_{comb} + h_{fg,H_2O} m_{f,H_2O}) \beta_{comb} + (e_S^{ch} - PCI_S) m_{f,S} + (e_{H_2O}^{ch}) m_{f,H_2O} \quad (3.2)$$

Tanto para o carvão quanto para a biomassa, o fator  $\beta_{comb}$  é calculado com as seguintes correlações:

$$\beta_{carvão} = 1,0437 + 0,014 \frac{m_{f,H}}{m_{f,C}} + 0,0968 \frac{m_{f,O}}{m_{f,C}} + 0,0467 \frac{m_{f,N}}{m_{f,C}} \quad (3.3)$$

$$\beta_{biomassa} = \frac{1,044 + 0,016 \frac{m_{f,H}}{m_{f,C}} - 0,3493 \frac{m_{f,O}}{m_{f,C}}}{[1 + 0,0531 \frac{m_{f,H}}{m_{f,C}}] + 0,0493 \frac{m_{f,N}}{m_{f,C}}} \quad (3.4)$$

$$1 - 0,4124 \frac{m_{f,O}}{m_{f,C}}$$

onde  $e_S^{ch}$  e  $e_{H_2O}^{ch}$  correspondem à exergia química específica do enxofre e da água, e  $m_{f,C}$ ,  $m_{f,H}$ ,  $m_{f,O}$  e  $m_{f,N}$  correspondem às frações de massa do carbono, do hidrogênio, do oxigênio e do nitrogênio, respectivamente.

(ii) *Eletricidade consumida*: assumindo que a energia elétrica usada nas etapas consideradas pela fronteira foi previamente gerada na usina termoelétrica, tal como se ilustra na Figura 3.3, é possível quantificar a exergia consumida devido ao uso desta fonte energética em cada uma das etapas a montante do ciclo térmico.

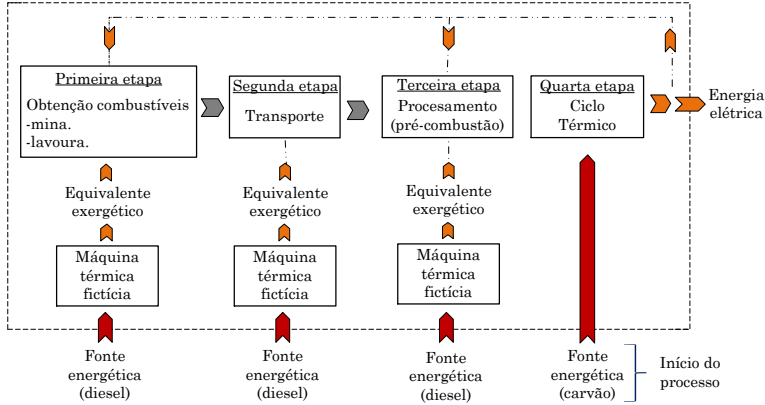


Figura 3.3 – Fronteira considerando as etapas do sistema.

(iii) *Outras fontes energéticas*: outras fontes energéticas (diesel, carvão, gás natural, etc.) utilizadas em processos das etapas a montante do ciclo térmico sugerem ser “levadas” à mesma base da energia elétrica gerada na usina. Para isso, é proposto um valor equivalente que é calculado assumindo que essa fonte energética seja utilizada por uma máquina térmica “fictícia”, com eficiência térmica equivalente à eficiência do ciclo termodinâmico da usina  $\eta_{eq}$  (ver Figura 3.3). Assim, o equivalente exergético ( $\dot{E}_{eq-j}$ ) associado à  $j$ th fonte energética pode ser estimado mediante a Equação 3.5.

$$\dot{E}_{eq-j} = PCI_j \dot{m}_j \eta_{eq} \quad (3.5)$$

Uma vez quantificados os fluxos de exergia e o impacto ambiental associado a cada etapa do sistema, é possível continuar com o terceiro passo da proposta metodológica.

### 3.2.3 Passo 3: Análise dos resultados

O propósito do terceiro passo é avaliar a informação obtida da análise geral (referente aos dois primeiros passos da estrutura metodológica) e identificar as etapas relevantes do sistema, seja por seu

consumo exergético, seja pelo impacto ambiental gerado.

O impacto ambiental total do processo de geração termoeleétrica é obtido somando os impactos diretos e indiretos. O impacto indireto é ocasionado pela utilização de alguma fonte energética (eletricidade, calor, combustível, etc.) em etapas localizadas a montante da usina termoeleétrica e pelo impacto gerado durante períodos de construção e descarte de equipamentos que fazem parte de ditas etapas. O impacto direto corresponde ao impacto gerado durante a operação da usina termoeleétrica.

Para a categoria de impacto mudança climática, o interesse é focado na geração de gases de efeito estufa (GEE). Dessa forma, o fluxo mássico desses gases originados por impactos indiretos ( $\dot{B}_{GEE}^{ind}$ ) é calculado como o produto entre o impacto ambiental específico com base na unidade funcional ( $b_{ind}^{uf}$ , valor identificado na análise de ciclo de vida) e a potência elétrica gerada pela usina, como mostra a Equação 3.6, para cada etapa  $z$  considerada na fronteira.

$$\dot{B}_{GEE}^{ind} = \sum_{z=1}^n b_{ind}^{uf} \dot{W}_e \quad (3.6)$$

Para o caso de uma usina termoeleétrica, as emissões devidas a impactos diretos ( $\dot{B}_{GEE}^{dir}$ ) são geradas, principalmente, durante o processo de combustão no gerador de vapor. Como visto na Equação 3.7, o fluxo mássico destes gases, originados por impactos específicos diretos ( $b_{dir}^{uf}$ ), são calculados, de forma análoga ao cálculo proposto para impactos indiretos. Foi considerado que  $j$  é igual a 1, dado que, de todos os componentes do ciclo térmico, somente o gerador de vapor apresenta impacto direto.

$$\dot{B}_{GEE}^{dir} = \sum_{j=1}^n b_{dir}^{uf} \dot{W}_e \quad (3.7)$$

É importante observar que os impactos ambientais específicos foram estimados com base na unidade funcional, que, por sua vez, está relacionada com o produto final. Para o caso de geração termoeleétrica, a unidade funcional corresponde à unidade de energia gerada (MJ, GJ, MWh, GWh, etc) e, por essa razão, o cálculo dos fluxos mássicos totais, tanto de impactos diretos como indiretos, foram feitos considerando o

total da energia gerada pela usina.

Como apresentado por Portha *et al.* (2010), uma forma alternativa para o cálculo da razão do fluxo dos impactos diretos consiste no produto entre o fluxo mássico da  $j$ th emissão liberada durante a combustão e o índice  $GWP_j$  para cada emissão, como visto na Equação 3.8.

$$\dot{B}_{GEE}^{dir} = \sum_{j=1}^n \dot{m}_j^{GEE} GWP_j \quad (3.8)$$

Três parâmetros principais são considerados na análise exergética: A exergia total consumida ( $\dot{E}_{total,C}$ ), a razão de exergia consumida ( $y_{C,z}$ ) em cada etapa  $z$  e a eficiência global do processo ( $\eta_{global}$ ) considerando a fronteira estendida. A exergia total consumida pelo sistema é calculada de acordo com a Equação 3.9:

$$\dot{E}_{total,C} = \dot{E}_{D,usina} + \sum_{z=1}^n \dot{E}_{C,z} \quad (3.9)$$

onde  $\dot{E}_{D,usina}$  é a exergia destruída na usina termoeletrica e  $\dot{E}_{C,z}$  é a exergia consumida na etapa  $z$  seguindo as suposições apresentadas na Seção 3.2.2.2, e corresponde à soma da energia elétrica utilizada e ao equivalente exergético calculado mediante a Equação 3.5.

A razão de exergia consumida da etapa  $z$  ( $y_{C,z}$ ) é calculada através da Equação 3.10.

$$y_{C,z} = \frac{\dot{E}_{C,z}}{\dot{E}_{total,C}} \quad (3.10)$$

Por último, a eficiência global ( $\eta_{global}$ ), calculada como se indica na Equação 3.11:

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{E}_{fonte}} \quad (3.11)$$

onde  $\dot{E}_{fonte}$  corresponde às fontes energéticas entrando através da fronteira do sistema e  $\dot{W}_e$  é a energia elétrica efetiva saindo do sistema como foi indicado na Figura 3.3.

Com a informação derivada da análise geral do problema, é possível identificar fluxos de exergia e o impacto ambiental associado às etapas definidas para o problema aqui abordado. Considerando as características do problema, resulta evidente que a etapa correspondente à usina termoeletrica é a mais relevante, principalmente, devido à destruição de exergia e ao alto impacto ambiental ligado ao processo de combustão no gerador de vapor. Por esta razão, a análise local apresentada a seguir se centra na usina termoeletrica.

## 3.3 Análise local do problema

Como visto na Figura 3.1, a análise local consiste em dois passos: a análise exergoambiental e avaliação de resultados.

### 3.3.1 Passo 4: Análise exergoambiental

A metodologia de análise exergoambiental visa determinar a relação entre o balanço termodinâmico e o impacto ambiental associado aos processos que fazem parte do sistema em estudo. Como apresentado por Meyer *et al.* (2009), uma análise exergoambiental consiste em três partes. A primeira corresponde à análise exergética do sistema. A segunda consiste em quantificar o valor do impacto ambiental fazendo uso do método de avaliação do ciclo de vida. Finalmente, a terceira parte identificada como balanço exergoambiental, avalia o impacto ambiental de cada componente ( $\dot{Y}_n$ , calculado pelo método ACV), somado aos impactos ambientais diretos e indiretos (obtido mediante a análise geral e quantificado no Passo 3 da proposta metodológica) e é atribuído aos fluxos de exergia envolvidos, permitindo com isso, identificar e analisar o sistema termodinâmico e a contribuição de cada componente. Essas partes são descritas a seguir.

#### 3.3.1.1 Primeira parte: a análise exergética

Conforme foi indicado na estrutura da proposta metodológica, a análise exergética local requer a definição da fronteira levando em consideração os resultados obtidos da análise geral do problema. No caso aqui analisado, a fronteira local corresponde ao ciclo termodinâmico da usina. Para condições de regime permanente, as expressões para o

balanço de massa, de energia e de exergia, correspondem às Equações 3.12, 3.13 e 3.14, respectivamente:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (3.12)$$

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{W}_{vc} = \sum_s h_s \dot{m}_s - \sum_e h_e \dot{m}_e \quad (3.13)$$

$$\sum_s \dot{m}_s e_s^{ph} - \sum_e \dot{m}_e e_e^{ph} = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) + \dot{W} - \dot{E}_D \quad (3.14)$$

onde, por convenção, os fluxos de energia entrando (em qualquer de suas formas) ao sistema são considerados positivos, e os fluxos de energia saindo do sistema são negativos. Para o cálculo da exergia física, foi considerado o estado de referência padrão, sendo a pressão de 101.325 Pa e a temperatura de 25 °C. Mudanças na energia cinética e potencial dos fluxos materiais são consideradas insignificantes.

A análise individual do  $n$ -ésimo componente do sistema, requer a classificação de seus fluxos associados, como fluxo de exergia fonte ( $\dot{E}_{f,n}$ ) ou fluxo de exergia produto ( $\dot{E}_{p,n}$ ). Assim, por exemplo, o vapor superaquecido entrando em uma turbina corresponde à exergia fonte, enquanto o trabalho de eixo saindo da mesma corresponde ao termo associado à exergia produto. Uma vez quantificados estes termos, são determinados os parâmetros de desempenho, como a exergia destruída ( $\dot{E}_{D,n}$ ), a razão de destruição de exergia ( $y_{D,n}$ ) e a eficiência de segunda lei ( $\eta_{II,n}$ ) de cada componente, mediante as Equações 3.15, 3.16 e 3.17, dadas a seguir:

$$\dot{E}_{D,n} = \dot{E}_{f,n} - \dot{E}_{p,n} \quad (3.15)$$

$$y_{D,n} = \frac{\dot{E}_{D,n}}{\dot{E}_{D,total}} \quad (3.16)$$

$$\eta_{II,n} = \frac{\dot{E}_{p,n}}{\dot{E}_{f,n}} \quad (3.17)$$



Os parâmetros de desempenho do ciclo termodinâmico considerados pela análise exergética são a eficiência de segunda lei da termodinâmica ( $\eta_{II}$ ) e a exergia total destruída. Estes parâmetros são calculados mediante as Equações 3.18 e 3.19, indicadas a seguir:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{E}_{comb}^{ch}} \quad (3.18)$$

$$\dot{E}_{D,total} = \sum_n \dot{E}_{D,n} \quad (3.19)$$

onde  $\dot{W}_e$  é a potência elétrica gerada pela usina. O procedimento de cálculo da exergia química do combustível ( $\dot{E}_{comb}^{ch}$ ) para o problema aqui abordado, foi previamente indicado mediante as Equações 3.1 a 3.4. O valor do poder calorífico inferior (PCI) é estimado a partir da análise elementar do combustível, como indicado no Apêndice C, Equação C.8. Além dos parâmetros de desempenho, a análise exergética permite identificar a exergia transportada pelos fluxos materiais entrando e saindo de cada componente.

### 3.3.1.2 Segunda parte: a análise ambiental

Do mesmo modo que para o enfoque geral, para a análise ambiental local, é proposto o método de avaliação de ciclo de vida, e a categoria de impacto mudança climática é avaliada seguindo o modelo de caracterização 100a do *IPCC*<sup>6</sup> e o índice *GWP*.

Os fluxos materiais que entram e saem do sistema, além de transportar energia e exergia, são portadores de um impacto ambiental, que, por conveniência, é calculado com base na unidade funcional definida para o processo e que foi denominado como direto ou indireto, conforme visto no Passo 3 da estrutura metodológica. O impacto ambiental específico, com base na unidade funcional ( $b_{ind}^{uf}$ ) do combustível entrando no gerador de vapor, foi identificado mediante a ACV nas etapas a montante da usina. Já o impacto direto com base na unidade funcional ( $b_{dir}^{uf}$ ) é associado ao período de operação da usina termoeletrica e se origina principalmente por processos reativos como o caso da combustão no gerador de vapor.

---

<sup>6</sup>Em inglês: *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Além dos impactos diretos e indiretos, existe o impacto ambiental ( $\dot{Y}_n$ ), associado ao ciclo de vida do  $n$ ésimo componente da usina termoeétrica (gerador de vapor, turbina, condensador, trocadores de calor, etc). Esse impacto é calculado seguindo o método de análise de ciclo de vida, considerando os impactos devidos aos períodos de construção  $\dot{Y}_n^{co}$ , manutenção  $\dot{Y}_n^m$  e descarte  $\dot{Y}_n^{de}$  como indicado na Equação 3.20.

$$\dot{Y}_n = \dot{Y}_n^{co} + \dot{Y}_n^m + \dot{Y}_n^{de} \quad (3.20)$$

Desse modo, torna-se evidente que, para o caso do processo de geração termoeétrica, o impacto ambiental total deve-se à soma dos impactos indiretos gerados nas etapas a montante da usina, dos impactos diretos gerados em processos reativos, como no caso da combustão no gerador de vapor, e da soma dos impactos ambientais associados aos “ $n$ ” componentes que constituem o sistema, tal como mostra a Equação 3.21.

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = \dot{B}_{GEE}^{ind} + \dot{B}_{GEE}^{dir} + \sum_{n=1}^m \dot{Y}_n \quad (3.21)$$

A Figura 3.4 esquematiza a localização dos impactos anteriormente mencionados.

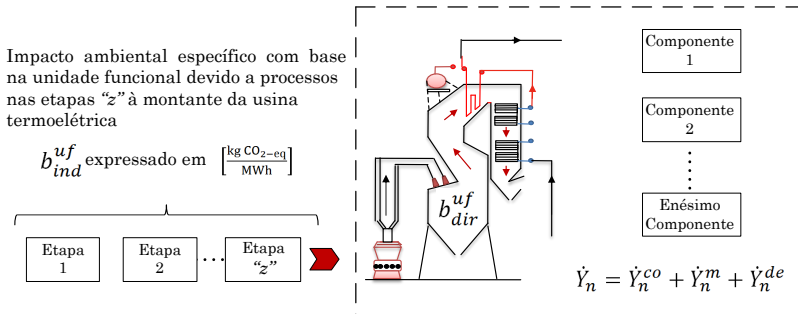


Figura 3.4 – Fronteira local do problema e impactos ambientais considerados.

### 3.3.1.3 Terceira parte: balanço exergoambiental

Uma vez identificado o impacto ambiental total associado ao processo, o balanço exergoambiental consiste na alocação do impacto ambiental total nos diferentes componentes considerados na fronteira, e no cálculo de variáveis exergoambientais associadas a ditos fluxos. Para isso, é elaborado um sistema de equações de balanço para cada um dos componentes que formam o sistema. Dependendo de sua complexidade, é possível que o número de equações seja inferior ao número de incógnitas, tornando o problema indeterminado. Nesse caso, faz-se necessário o uso de equações auxiliares obtidas mediante os princípios *F* e *P*, indicados na proposta de análise exergoeconômica abordada em Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), e sintetizados abaixo:

Princípio *F*: indica que o impacto ambiental específico por unidade de exergia  $b_f$ , associado a um fluxo de exergia extraído de um fluxo “fonte”, deve ser igual ao impacto ambiental específico que dito fluxo recebeu em outro componente localizado a montante. Ou seja, a partir do princípio *F*, são formuladas equações para fluxos materiais que fornecem exergia ao componente (denominados como “fluxos fonte”).

Princípio *P*: a partir do princípio *P* são formuladas equações para fluxos cuja exergia aumenta dentro do componente, ou fluxos de exergia gerados no interior do componente em questão (denominados como “fluxos produto”). O aumento da exergia é parte da exergia do produto do componente. Portanto, cada unidade de exergia é fornecida para esses fluxos com o mesmo impacto ambiental específico médio  $b_p$ .

Assim, cada fluxo de exergia saindo de um componente corresponde a um fluxo fonte ou a um fluxo produto. Os princípios *F* e *P* fornecem as equações auxiliares necessárias para fechar o sistema de balanço de equações de um sistema.

Para um volume de controle em regime permanente, a equação geral para o balanço do impacto ambiental é dada pela Equação 3.22:

$$\dot{B}_q + \dot{B}_w + \dot{Y}_n + \dot{B}_n^{fi} + \dot{B}_{diss,n} = \sum_{j=1}^n \dot{B}_{j,s} - \sum_{j=1}^n \dot{B}_{j,e} \quad (3.22)$$

onde  $\dot{B}_q$  e  $\dot{B}_w$  correspondem, respectivamente, aos fluxos do impacto

ambiental associados ao fluxo de calor e ao trabalho atravessando a fronteira do sistema, calculados por meio das Equações 3.23 e 3.24:

$$\dot{B}_q = b_q \dot{E}_q = b_q \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \quad (3.23)$$

$$\dot{B}_w = b_w \dot{W} \quad (3.24)$$

onde  $b_q$  e  $b_w$  são, respectivamente, o impacto ambiental específico por unidade de exergia devido aos fluxos de calor e trabalho.

De forma análoga à energia ou exergia transportada por um fluxo material, o impacto ambiental transportado pelo fluxo  $j$ , identificado como  $(\dot{B}_j)$ , é calculado como visto na Equação 3.25 e expressado em  $\left[\frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}}\right]$ :

$$\dot{B}_j = \dot{E}_j b_j \quad (3.25)$$

onde  $b_j$  é definido como o impacto ambiental específico por unidade de exergia (UE), expressado em  $\left[\frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{UE}}\right]$  para o fluxo  $j$ , e  $\dot{E}_j$  é a exergia do mesmo.  $\dot{B}_n^{fi}$  é a variável proposta com base no trabalho de Boyano *et al.* (2011) e corresponde à formação de impacto no interior do componente  $n$ . Por exemplo, para o caso do gerador de vapor e para a categoria de impacto mudança climática, esta variável corresponde ao fluxo de impacto direto, identificado pela Equação 3.7.  $\dot{B}_{diss,n}$  corresponde ao impacto ambiental associado a componentes dissipativos que fazem parte do sistema. Como definido por Meyer *et al.* (2009), são considerados componentes dissipativos aqueles que não tem uma finalidade própria, sua única função no sistema é servir a outros componentes, como no caso das válvulas para as quais não é possível definir um produto. O valor do impacto gerado pelo componente dissipador é somado ao componente que serve. A Equação 3.26 mostra que o valor do impacto do componente dissipador depende da diferença de exergia ( $\Delta \dot{E} = \dot{E}_e - \dot{E}_s$ ) e do impacto ambiental específico do fluxo entrando no mesmo.

$$\dot{B}_{diss,n} = b_{e,j} \Delta \dot{E} \quad (3.26)$$

Uma vez realizado o balanço, é possível definir as variáveis exergo-ambientais que são usadas para a avaliação do desempenho ambiental dos componentes do sistema. É importante reiterar que as variáveis aqui apresentadas correspondem às indicadas na metodologia de análise exergoambiental, proposta por Meyer *et al.* (2009), que, por sua vez, apresenta analogia com as variáveis propostas para a análise exergoeconômica dada por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996).

(i) *Impacto ambiental específico de fonte e produto* ( $b_{j,n}$ ): a média específica do impacto ambiental em base exergética de “produto” e “fonte” para o  $n$ -ésimo componente estará dado por:

$$b_{p,n} = \frac{\dot{B}_{p,n}}{\dot{E}_{p,n}} \quad (3.27)$$

e

$$b_{f,n} = \frac{\dot{B}_{f,n}}{\dot{E}_{f,n}} \quad (3.28)$$

onde  $\dot{B}_{p,n}$  e  $\dot{B}_{f,n}$  são fluxos do impacto ambiental associado ao “produto” ou à “fonte” do  $n$ -ésimo componente, e  $\dot{E}_{p,n}$  e  $\dot{E}_{f,n}$  são fluxos de exergia de fluxos materiais identificados como “produto” e “fonte” no componente. De modo geral, o valor calculado para essas variáveis, depende da posição relativa do componente dentro do sistema e sua interação com outros componentes.

(ii) *Impacto ambiental associado à exergia destruída* ( $\dot{B}_{D,n}$ ): o impacto ambiental associado à exergia destruída no  $n$ -ésimo componente pode ser calculado pela Equação 3.29. Observa-se que o resultado está influenciado pelo valor do impacto ambiental específico  $b_{f,n}$ , que, por sua vez, depende de sua posição dentro do sistema.

$$\dot{B}_{D,n} = b_{f,n} \dot{E}_{D,n} \quad (3.29)$$

(iii) *Impacto ambiental total associado ao  $n$ -ésimo componente* ( $\dot{B}_{total,n}$ ): indica o grau de relevância, do ponto de vista ambiental, do componente dentro do sistema. Como mostra a Equação 3.30, ( $\dot{B}_{total,n}$ ) é calculado como a soma do impacto do componente durante seu ciclo de vida  $\dot{Y}_n$ , do impacto devido à exergia destruída no  $n$ -ésimo componente  $\dot{B}_{D,n}$  e do impacto devido à formação de impacto no interior do componente  $\dot{B}_n^{fi}$ .

$$\dot{B}_{total,n} = \dot{Y}_n + \dot{B}_{D,n} + \dot{B}_n^{fi} \quad (3.30)$$

(iv) *Diferença relativa do impacto ambiental específico* ( $r_{b,n}$ ): indica o potencial para reduzir o impacto ambiental associado ao componente  $n$  e é calculada como a diferença entre os impactos específicos médios por unidade de exergia  $b_{p,n}$  e  $b_{f,n}$ , conforme indicado por:

$$r_{b,n} = \frac{b_{p,n} - b_{f,n}}{b_{f,n}} \quad (3.31)$$

(v) *Fator exergoambiental* ( $f_{b,n}$ ): fator que expressa a contribuição relativa entre o impacto devido ao componente  $n$  durante seu ciclo de vida  $\dot{Y}_n$  e seu impacto total.

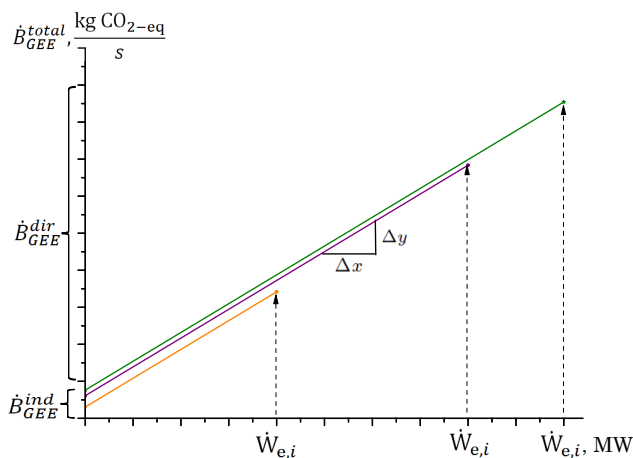
$$f_{b,n} = \frac{\dot{Y}_n + \dot{B}_n^{fi}}{\dot{Y}_n + \dot{B}_{D,n} + \dot{B}_n^{fi}} \quad (3.32)$$

Nota-se que o fator exergoambiental é sempre menor que a unidade, de modo que se o valor estiver próximo à unidade, o impacto ligado ao ciclo de vida do componente  $\dot{Y}_n$  será dominante, e, se o valor estiver próximo de zero, o impacto dominante estará relacionado à exergia destruída  $\dot{B}_{D,n}$ . Com relação aos componentes com formação de impacto ambiental devido a processos reativos, como no caso do gerador de vapor, se o valor do fator exergoambiental estiver próximo à unidade, essa variável  $\dot{B}_n^{fi}$  será dominante, e, se o valor estiver próximo de zero, o impacto dominante seguirá relacionado à exergia destruída  $\dot{B}_{D,n}$ .

As variáveis exergoambientais propostas na metodologia apresentada por Meyer *et al.* (2009) permitem a avaliação do enésimo componente do sistema, com base nos resultados obtidos a partir do sistema de equações previamente formulado. No entanto, não é possível identificar o comportamento global do sistema do ponto de vista exergético e ambiental, já que não há um limite comparável ou de referência para tal finalidade. Pelo anterior, a seguir é apresentado um fator exergoambiental global ( $f_{GEE}^{ea}$ ) que visa a avaliação do sistema considerando a fronteira estendida.

(vi) *Fator exergoambiental global* ( $f_{GEE}^{ea}$ ): na Seção 3.2.3, foram definidos os impactos indiretos como aqueles que são gerados em eta-

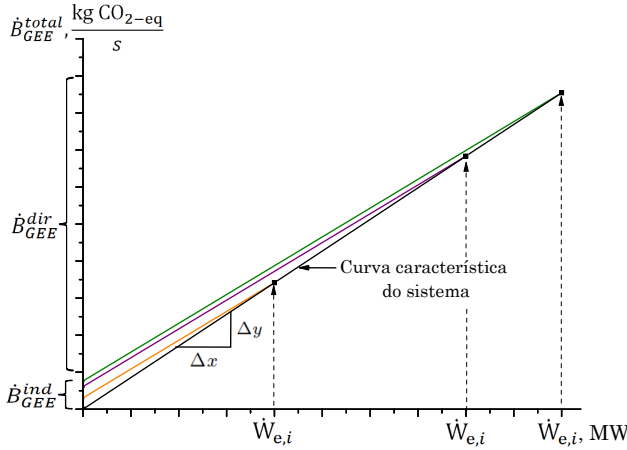
pas a montante da usina termoeletrica, ou seja, ao impacto gerado em processos que servem à usina e que pode ser chamado de impacto exergoambiental não associado à geração de eletricidade. Igualmente, a magnitude do impacto direto associado à combustão do combustível no gerador de vapor depende da quantidade de energia gerada, que, por sua vez, para uma condição de regime permanente, mantém uma relação linear com a quantidade de carvão entrando no processo. Assim, o processo de geração termoeletrica, considerando impactos diretos e indiretos, para diferentes condições de geração  $\dot{W}_{e,i}$ , pode ser representado como se mostra na Figura 3.5a.



(a) Comportamento linear do processo de geração termoeletrica.

O eixo  $x$  representa a potência elétrica gerada pelo sistema e o eixo  $y$ , o fluxo de impacto total  $\dot{B}_{GEE}^{total}$  dado pela Equação 3.21. A intersecção com o eixo  $y$  corresponde ao impacto emitido em etapas a montante da usina termoeletrica.

A Equação 3.33 mostra o comportamento linear do sistema caracterizado pela equação  $y = mx + b$ , onde  $m$  corresponde à inclinação e  $b$  o corte com o eixo  $y$  indicado como  $\dot{B}_{GEE}^{ind}$ .



(b) Curva característica do processo considerando a fronteira estendida.

Figura 3.5 – Conjunto de curvas características do processo de geração termoeletrônica.

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = m \dot{W}_{e,i} + \dot{B}_{GEE}^{ind} \Rightarrow \begin{cases} m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{b_{dir}^{uf} \dot{W}_{e,i}}{\dot{W}_{e,i}} \\ \dot{B}_{GEE}^{ind} = b_{ind}^{uf} \dot{W}_{e,i} \end{cases} \quad (3.33)$$

A partir da Equação 3.33, é possível caracterizar o sistema para diferentes potências de saída. A curva que caracteriza o sistema, considerando a fronteira estendida, será aquela que une os pontos identificados para cada  $\dot{W}_{e,i}$  e passa pela origem do sistema cartesiano (como visto na Figura 3.5b), sendo representada pela Equação 3.34.

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = m \dot{W}_{e,i} \quad (3.34)$$

Tomando por parâmetro de comparação a eficiência máxima teórica, que pode ser alcançada por uma máquina térmica (condição Carnot), o ponto de operação de mínimo impacto será alcançado quando a máquina térmica operar nesta condição. Neste caso, a inclinação da



curva é menor do que no caso do sistema gerando em sua condição de operação, como pode ser visto na Figura 3.6.

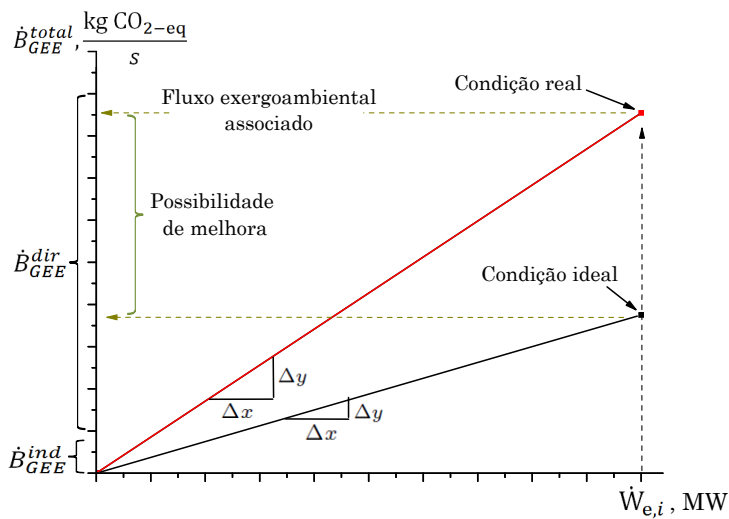


Figura 3.6 – Curva de operação do sistema em condição Carnot.

A partir da informação da Figura 3.6, é proposto um fator exergoambiental ( $f_{GEE}^{ea}$ ) que consiste no quociente do fluxo exergoambiental para uma condição ideal (que, como indicado anteriormente, corresponde à condição ideal da máquina térmica de Carnot e que serve de parâmetro fixo de comparação) e do fluxo exergoambiental correspondente com a condição de operação do sistema, como se indica na Equação 3.35.

$$f_{GEE}^{ea} = \frac{\dot{B}_{GEE}^{total} (condição\ ideal)}{\dot{B}_{GEE}^{total}} \quad (3.35)$$

Observando a Equação 3.35 e a Figura 3.6, é possível concluir que o fator exergoambiental ( $f_{GEE}^{ea}$ ) é um valor menor que a unidade. É importante dizer que o ponto ideal de operação, é estimado em função das temperaturas absolutas do sistema, que, para o caso aqui apresentado, corresponde a uma máquina que opera com a eficiência da máquina

térmica de Carnot.

### 3.3.2 Passo 5: Análise dos resultados

A partir das variáveis exergoambientais apresentadas no Passo 4 da estrutura metodológica, é possível realizar a análise individual dos componentes do sistema, identificando quais deles apresentam possibilidades de melhora. O fator exergoambiental global permite visualizar o desempenho do sistema para diversas condições de operação em combustão combinada, em relação a um parâmetro fixo de comparação. Além da informação apresentada em tabelas ou figuras, a análise de resultados deve considerar diagramas que permitam visualizar as ordens de grandeza dos fluxos de exergia e de impacto ambiental envolvidos e sua relação com os diferentes componentes do sistema.

## 3.4 Síntese do capítulo

No presente capítulo, foi apresentada uma proposta metodológica para a análise exergética e ambiental do processo de geração, considerando os impactos ambientais indiretos, gerados durante a obtenção e manuseio do combustível utilizado em uma usina termoeletrica, e a exergia consumida em ditos processo. Duas partes foram identificadas, uma que consiste em um enfoque geral do problema, e outra que corresponde a uma visão local do ciclo termodinâmico. No capítulo seguinte, será realizada a aplicação da proposta metodológica, com relação à primeira parte (Passos 1, 2 e 3), no processo de geração termoeletrica, avaliando dois cenários; operação atual com 100% de carvão denominado cenário A, e o cenário B que corresponde com a operação em combustão combinada 90% de carvão e 10% de biomassa. Finalmente, é importante ressaltar que, por tratar-se de uma estrutura metodológica, a mesma pode ser adaptada para a avaliação de outros processos produtivos.

## ***4 Análise geral do processo de geração termoeleétrica***

Este capítulo apresenta a análise geral do processo de geração termoeleétrica, seguindo os três primeiros passos da proposta metodológica apresentada no capítulo anterior. Para isso, é usada a estrutura existente de uma usina de 50 MWe nominais, pertencente ao complexo termoeletrico Jorge Lacerda, projetada para queimar carvão pulverizado e adaptada para operação em combustão combinada. Para possibilitar a avaliação dos dois cenários (operação 100% carvão e combustão combinada 90% carvão e 10% biomassa), a fronteira do problema considera tanto a rota de abastecimento do carvão, desde a fonte localizada na região carbonífera do estado de Santa Catarina, quanto a rota proposta para o aproveitamento da biomassa residual com fins energéticos.

### **4.1 Passo 1: Reconhecimento do problema**

Como resultado do reconhecimento visual dos processos, é sugerida uma fronteira estendida que considera o processo de transformação energética na usina e as rotas tecnológicas para a obtenção e manuseio do carvão e da biomassa. Como indicado na Figura 4.1, a fronteira é composta por quatro etapas: as três primeiras relacionadas às rotas de entrega do combustível (obtenção, transporte e processamento pré-combustão), e a quarta relacionada ao ciclo térmico.

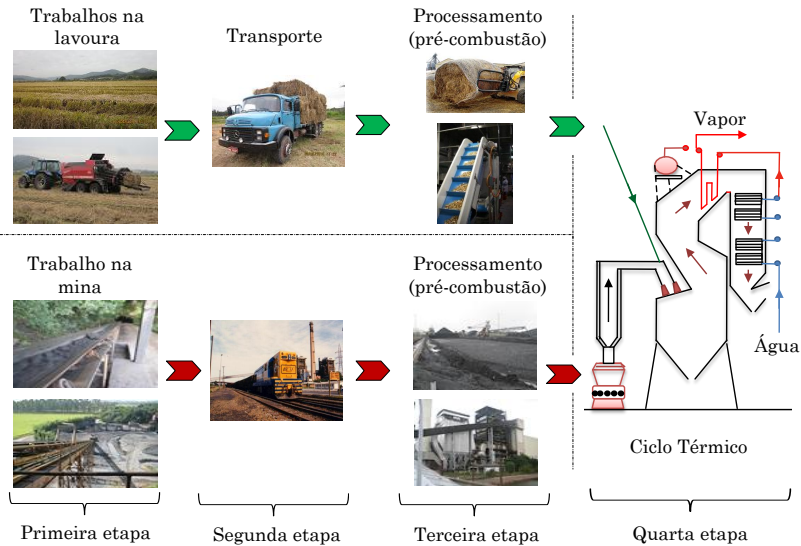


Figura 4.1 – Identificação da fronteira.

#### 4.1.1 Descrição da usina termoeleétrica

A usina termoeleétrica considerada para a análise faz parte do complexo termoeletrico Jorge Lacerda, que está localizado no município de Capivari de Baixo, a 140 km ao sul da cidade de Florianópolis. O complexo dispõe de sete unidades geradoras e conta com uma capacidade total instalada de 857 MWe. A Figura 4.2 mostra a vista aérea do complexo.

A usina geradora destinada ao estudo em combustão combinada, conta com uma capacidade nominal de 50 MWe e é constituída por uma caldeira MAN aquotubular de circulação natural de duplo passe que opera em ciclo de Rankine, com duas turbinas a vapor MAN de alta e baixa pressão sem aquecimento intermediário, um alternador BBC-Brown Boveri refrigerado com hidrogênio e um condensador de ciclo aberto. As Figuras 4.2b e 4.2c mostram a localização da usina no complexo termelétrico.

As características nominais e operacionais da usina podem ser vistas na Tabela 4.1. Para a modelagem termodinâmica, foram conside-

radas as características operacionais e o ciclo térmico apresentado na Figura 4.3.

Tabela 4.1 – Características operacionais da UTLA-1.

Parâmetro	Nominal	Operação <sup>†</sup>
Temperatura água entrada caldeira	210 °C	210 °C
Pressão água entrada caldeira	98,1 bar	96,8 bar
Temperatura vapor saída caldeira	515 °C	510 °C
Pressão vapor saída caldeira	90,25 bar	89 bar
Potência elétrica gerada	50 MWe	45,8 MWe
Fluxo de vapor gerado	165 t/h	185 t/h

<sup>†</sup>Dados de operação em 14/07/2010.



a. Vista aérea complexo termoeletrico Jorge Lacerda.

Adaptado de: <http://www.google.com/earth/index.html>



b. Localização UTLA-1



c. UTLA-1

Figura 4.2 – Vista aérea do complexo termoeletrico Jorge Lacerda.

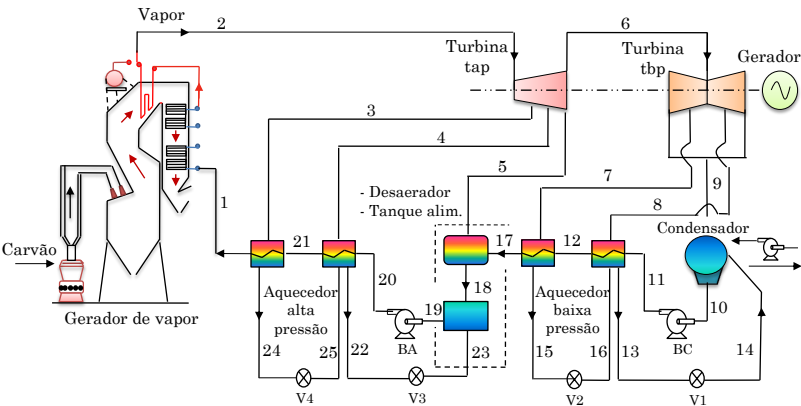


Figura 4.3 – Ciclo térmico.

4.1.2 Descrição da rota do carvão

A jazida do carvão da região sul do Brasil está localizada principalmente no estado do Rio Grande do Sul e na região sul do estado de Santa Catarina. O carvão que abastece o complexo termoeletrico Jorge Lacerda tem origem nas regiões carboníferas de Criciúma e Forquilha, distantes uma da outra aproximadamente 80 km. Considerando a quantidade de minério extraído, destacam-se as companhias mineradoras Carbonífera Criciúma, Rio Deserto e Carbonífera Metropolitana, as quais fornecem em torno de 60% do total do carvão consumido pelo complexo termoeletrico. Segundo a análise elementar apresentada na Tabela 4.2, trata-se de um carvão com alto teor de cinzas, catalogado como betuminoso de alta volatilidade, de acordo com Süffert (1997). A norma ASTM 388-92a classifica o carvão tomando como base o carbono fixo e material volátil, como antracito, betuminoso, sub-betuminoso e lignito.

Tabela 4.2 – Análise elementar do carvão no sul do estado de Santa Catarina.

Carvão	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cinza [%]	H <sub>2</sub> O [%]
Valor	18.837	18.168	46,14	3,01	6,66	0,82	1,17	41,9	0,3

Dependendo da característica da jazida, a extração do minério pode ser realizada a céu aberto ou seguindo técnicas de mineração subterrânea, como indicado na Figura 4.4. O carvão de minas subterrâneas pode ser extraído por meio de três técnicas: mineração por câmaras e pilares (*room and pillars*), mineração em frente longa (*longwall*) e mineração em frente curta (*shortwall*).

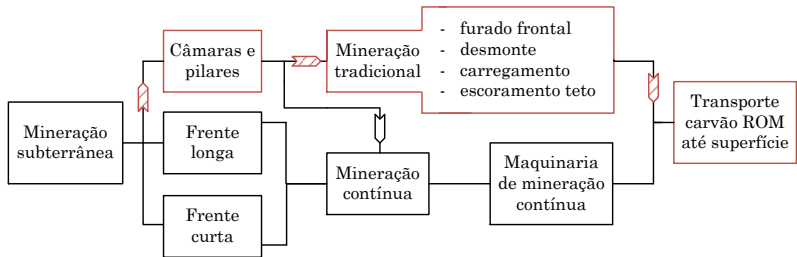


Figura 4.4 – Rotas tecnológicas em mineração subterrânea.

As companhias mineradoras da região sul do estado de Santa Catarina extraem o carvão de galerias subterrâneas, seguindo a técnica de câmaras e pilares mediante mineração tradicional ou mineração contínua. A técnica de câmaras e pilares consiste na extração do minério de quartos com dimensão de entre 6 e 9 m, enquanto sobram pilares com dimensão de entre 6 e 30 m, que servem de suporte para o teto da mina.

A Figura 4.5 ilustra as etapas consideradas para a rota de entrega do carvão. A primeira consiste na mineração subterrânea, seguindo a técnica de câmaras e pilares pelo método tradicional (linha destacada na Figura 4.4). A segunda etapa corresponde ao transporte da mina à usina termoeletrica. A terceira etapa envolve os processos de manuseio do carvão prévio à combustão. A seguir, são descritas as etapas que compreendem a rota do carvão.

#### 4.1.2.1 Primeira etapa da rota do carvão: processo de mineração

Nesta seção, é apresentada uma breve descrição dos processos que envolvem a obtenção do carvão energético (denominado CE4500) utilizado no complexo termoeletrico Jorge Lacerda. Para isso, foi tomada

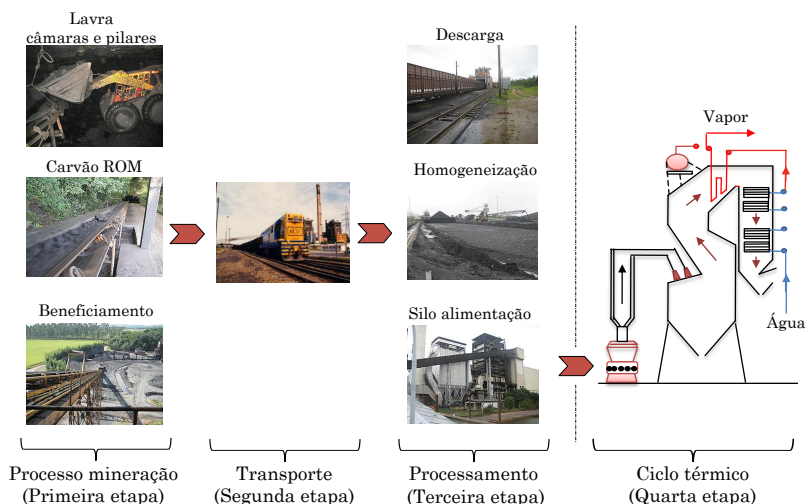


Figura 4.5 – Etapas definidas para a rota do carvão.

como referência a empresa Carbonífera Criciúma S.A., localizada no município de Forquilha, no sul de Santa Catarina, que conta com uma capacidade de produção que supera 100 mil toneladas de carvão ROM<sup>1</sup> por mês. A mineração consiste em dois sub-processos: o primeiro é a lavra, em que o carvão ROM sai da mina com todas as impurezas, e o segundo é o beneficiamento, onde o carvão é tratado para a obtenção de carvão energético CE4500 e de outros produtos comercializáveis.

A lavra é realizada por meio de mineração tradicional, seguindo a técnica de câmaras e pilares. Para a obtenção do minério, quatro operações são identificadas: a primeira é a furação frontal da parede, em que são feitos furos de até aproximadamente 3 m para alojarem as cargas explosivas utilizadas no desmonte; a segunda corresponde ao desmonte, que ocorre devido à detonação dos explosivos; a terceira é a operação de carregamento do material que foi obtido com a detonação, e a quarta operação é denominada escoramento do teto, que consiste em furar e escorar o teto com parafusos para evitar seu colapso. A

<sup>1</sup>Run of Mine. É o minério bruto, obtido diretamente da mina, sem sofrer nenhum tipo de beneficiamento; é retirado através de esteiras transportadoras ou vagonetes.



Figura 4.6 mostra as operações descritas anteriormente.



a. Operação de furado frontal.



b. Instalação cargas explosivas.  
Tomado de: Souza (2007)



c. Carregamento.



d. Escoramento do teto.

Figura 4.6 – Operações durante a lavra.

As Tabelas A1 a A6 do Apêndice A fornecem informações sobre os equipamentos utilizados na lavra para a extração do minério. Esses dados foram obtidos através de visita guiada à Carbonífera Criciúma S.A., de informações fornecidas pelo pessoal da operação e de trabalhos prévios realizados neste empreendimento mineiro por Souza (2007) e Schneider (2006).

O transporte do minério no interior da mina é feito por meio de esteiras transportadoras. A distância depende de onde esteja localizada a frente de mina, podendo variar entre poucos metros até 7 ou 8 km. A Figura 4.7a mostra aspectos do carregamento do carvão na frente de mina de onde é transportado até a caixa de embarque<sup>2</sup>. Da caixa

<sup>2</sup>Está localizada no interior da mina e recebe e direciona o carvão que vem das diversas frentes de mina para a esteira transportadora que leva o carvão até a superfície, através do plano inclinado.

de embarque o carvão é transportado até a superfície através do plano inclinado, onde se inicia o processo de britagem. A Figura 4.7b mostra a saída do plano.



a. Carregamento do carvão na frente de mina.



b. Carvão ROM plano inclinado transporte subsolo - superfície.

Figura 4.7 – Transporte do carvão ROM (frente de mina - superfície).

Outras operações relacionadas à lavra são a ventilação e o bombeamento da água subterrânea da mina. O sistema de ventilação garante uma adequada qualidade do ar e reduz a concentração de gases nocivos e insalubres. No caso específico da Carbonífera Criciúma, são utilizados vários exaustores de diferentes consumos nominais, dependendo da localização da frente de mina. Por sua parte, o sistema de bombeamento garante a extração da água obtida durante a mineração conhecida como drenagem ácida da mina<sup>3</sup> (DAM).

A água obtida durante a lavra é drenada para a superfície, tratada e misturada com outras fontes para ser utilizada no beneficiamento do carvão. A Figura 4.8 mostra o circuito da água nos processo de mineração e beneficiamento na Carbonífera Criciúma. Nota-se que, além da drenagem subterrânea, que apresenta uma vazão média de 475 m<sup>3</sup>/h, outras fontes, tais como águas pluviais e águas drenadas a montante que representam uma vazão aproximada de 290 m<sup>3</sup>/h, são somadas e direcionadas a uma bacia de 11.000 m<sup>3</sup> para serem tratadas (neutralização e decantação) e posteriormente utilizadas durante a lavagem no

<sup>3</sup>Refere-se à solução aquosa ácida gerada quando minerais sulfetados presentes em resíduos de mineração (rejeito ou estéril) são oxidados em presença de água. Trata-se de um dos mais graves impactos ambientais associados à atividade de mineração.

processo de beneficiamento, antes da sua deposição como efluente final. A neutralização é feita com cal extinto hidratado, na razão de 0,5 g/l ou 0,5 kg/m<sup>3</sup> de EDR3.

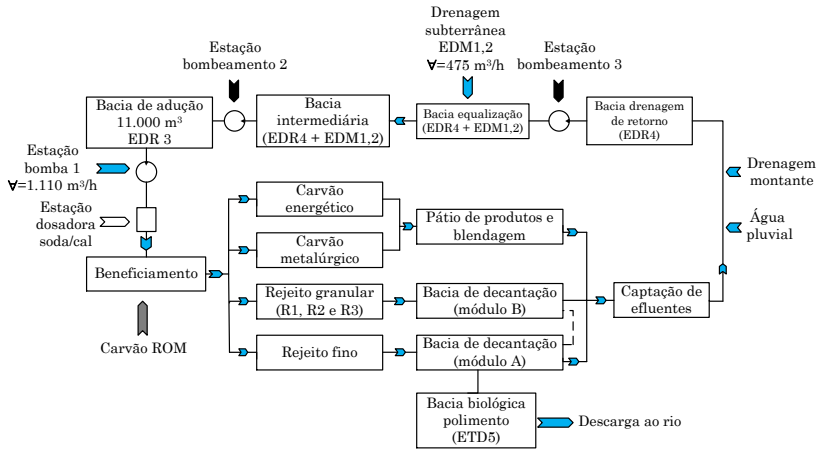


Figura 4.8 – Fluxograma circuito de água Carbonífera Criciúma.  
Adaptado de: Schneider (2006).

O beneficiamento do carvão ROM tem como objetivos homogeneizar o tamanho do carvão mediante o processo de britagem e reduzir o teor de cinzas durante a lavagem. A lavagem é feita mediante o processo de jigagem ou flutuado<sup>4</sup>. Nesta etapa são obtidos todos os produtos comercializados pela companhia mineradora. Como apresentado por Schneider (2006), a Tabela 4.3 mostra os balanços de massa dos produtos derivados do carvão ROM, obtidos durante o beneficiamento correspondente a um ano típico na Carbonífera Criciúma S.A. Nota-se que o material estéril representa cerca de 60% do total do minério extraído, enquanto o carvão energético CE4500 utilizado na usina termelétrica representa cerca de 30%. É importante ter presente que o processo de mineração é altamente complexo e que a informação aqui registrada é particular para uma companhia mineradora. A partir dos valores registrados é possível obter índices que eventualmente poderiam ser apreciados em processo de mineração similares, mas que não representariam fielmente o processo.

<sup>4</sup>Processo de concentração gravimétrica no qual a separação do material é realizada em um leito dilatado por uma corrente pulsante de água, produzindo, assim, a estratificação dos minerais.

As Tabelas A.7 e A.8 do Apêndice A fornecem informações referentes aos equipamentos que compõem a usina de beneficiamento e seus respectivos consumos nominais.

Tabela 4.3 – Balanço de massa dos produtos obtidos durante o beneficiamento do carvão ROM.

Carvão ROM	Volume (%)	Peso (t)
Carbonífera Criciúma	100	1.298.000
Rejeito R1	26,8	347.357
Rejeito R2	24,5	317.652
Rejeito R3	2,8	36.501
Finos	8,8	114.321
Total estéril	62,9	815.831
CE4500 (granulado)	28,9	375.929
CE5200 (granulado)	1,0	13.402
CE6200 (fino)	0,2	2.298
CE4500 (fino)	6,2	80.055
CE7280 (flutuado)	0,4	5.341
Carbotrat	28,96	375.929
Total Produtos	37,1	482.190

#### 4.1.2.2 Segunda etapa da rota do carvão: transporte mina - usina termoelétrica

Uma vez obtido o carvão energético CE4500, o mesmo deve ser transportado até o complexo termoelétrico, localizado a aproximadamente 80 km do centro de coleta. O transporte é realizado pela empresa Ferrovia Tereza Cristina S.A. (concessionária da malha ferroviária sul catarinense). As Tabelas A10 e A11 do Apêndice A mostram as características das locomotivas utilizadas e o histórico anual de consumo de óleo diesel e do carvão transportado. Durante o ano de 2010, foram movimentados aproximadamente 2,6 milhões de toneladas de carvão energético entre a região mineira e o complexo termelétrico.

#### 4.1.2.3 Terceira etapa da rota do carvão: processamento

O carvão que entra no complexo termoeletrico é homogeneizado e finalmente transportado por meio de esteiras até os silos alimentadores. A Figura 4.9 mostra aspectos da chegada dos vagões e das operações no pátio do complexo termoeletrico.

A movimentação do carvão no pátio é feita com máquinas a diesel, e a homogeneização é feita por meio de uma empilhadeira movimentada eletricamente, conforme mostram as Figuras 4.9d e 4.9e. A homogeneização visa colocar em um mesmo patamar, do ponto de vista energético, todo o carvão que chega ao complexo termoeletrico, dado que o carvão é procedente de, pelo menos, onze companhias carboníferas diferentes.

A Figura 4.10 mostra o fluxograma da movimentação do carvão desde o descarregamento até a entrada de cada uma das sete usinas que formam o complexo termoeletrico. A capacidade de transporte das esteiras TC38 e TC21 é de 750 t/h. A esteira transportadora TC1 que alimenta os silos das UTLA1 e UTLA2 tem capacidade de 180 t/h.

A Tabela A.12 do Apêndice A mostra o inventário dos equipamentos usados nesta etapa. O principal consumo associado ao manuseio do carvão nos pátios da usina é de energia elétrica, considerando que todos os sistemas de transporte por esteira são conduzidos por motores elétricos.

Como resultado do reconhecimento visual da rota do carvão, é proposto o fluxograma indicado na Figura 4.11, o qual mostra a inter-relação entre as operações e sub-processos com os fluxos considerados vitais em cada uma das etapas identificadas pela fronteira do problema e que serve de base para a elaboração do inventário de ciclo de vida do cenário A.

#### 4.1.3 Definição da rota da biomassa

Diferentemente do carvão, a rota para a obtenção e manuseio da biomassa residual, aqui analisada, corresponde a um caso específico que está sendo documentado no complexo termoeletrico Jorge Lacerda e que visa o aproveitamento de biomassa residual proveniente das lavouras de arroz das regiões vizinhas ao complexo.



a. Descarregamento.



b. Vagão de carga.



c. Entrada do pátio da usina.



d. Manuseio do carvão em pátio.



e. Homogeneização do carvão.



f. Esteira transportadora silo UTLA-1.

Figura 4.9 – Manuseio do carvão energético no complexo termoeletrico Jorge Lacerda.

Considerando as maiores culturas agrícolas, o Brasil conta com mais de 220 Mt de resíduos agrícolas por ano, o que representa um potencial energético aproximado de 4 EJ, de acordo com Pereira, Bazzo e Oliveira (2009). Durante o ano de 2009, a produção de grãos superou

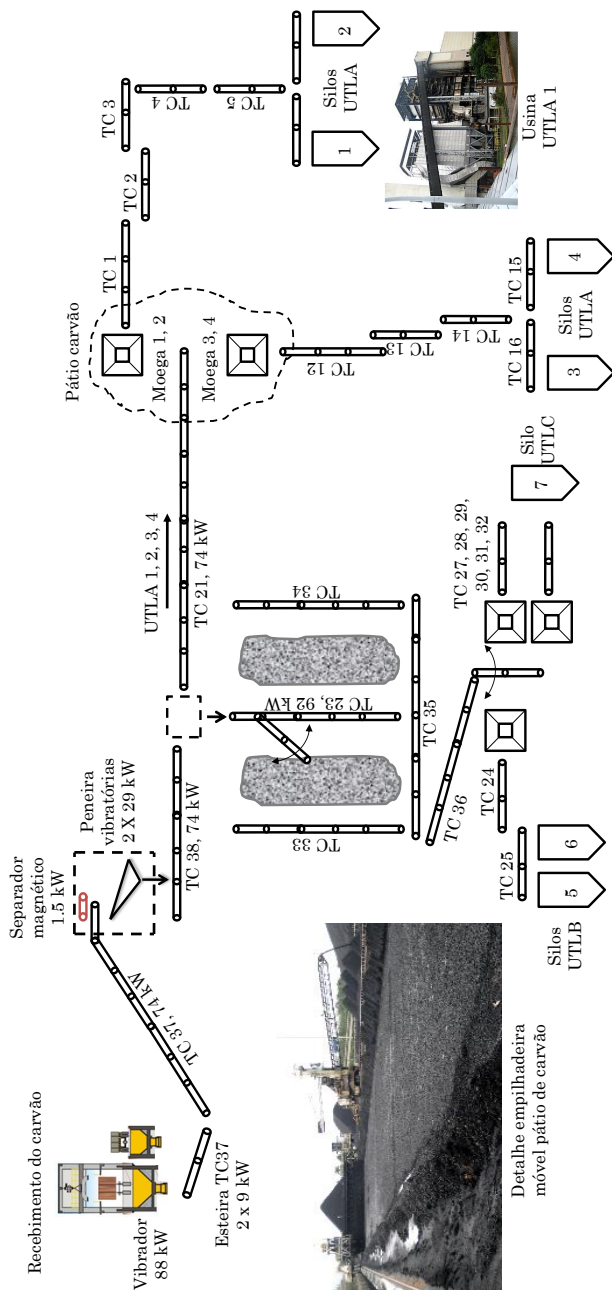


Figura 4.10 – Movimentação do carvão energético no complexo termoeletrico.

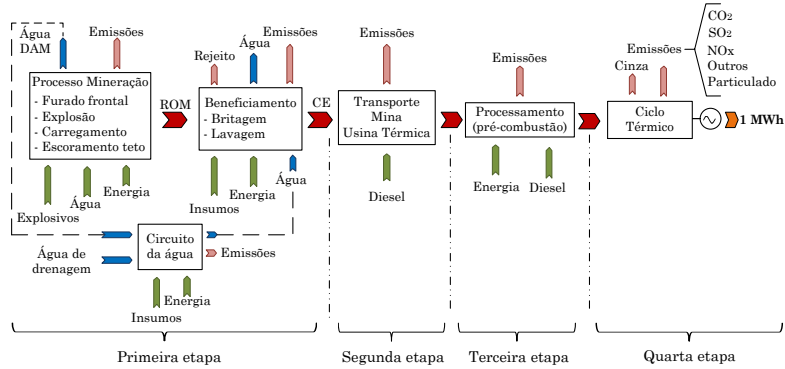


Figura 4.11 – Fluxograma proposto na avaliação do cenário A.

os 145 milhões de toneladas, colocando o Brasil entre os líderes mundiais no setor agrícola IBGE (2009). Dentre os cultivos representativos encontram-se a soja, o milho, a mandioca, o arroz, o café, o algodão e a cana de açúcar que registrou um importante aumento na produção passando de 380 mil toneladas, em 2006, para mais de 600 mil, em 2010. Segundo a CONAB (2011), a soja apresentou uma safra que superou os 65 Mt de grão, em 2010, sendo que a biomassa residual pode representar aproximadamente 31% do total do potencial energético bruto nacional.

A região sul do estado de Santa Catarina está constituída pelas microrregiões de Araranguá, Criciúma e Tubarão. Uma das culturas agrícolas de maior destaque é o arroz, que apresenta uma área plantada de mais de 90 mil hectares. Segundo a EPAGRI/CEPA (2010), durante os últimos três biênios, em média, foram produzidas 615 mil toneladas de grão, o que representa um potencial aproximado de biomassa residual de 500 mil toneladas. A Tabela 4.4 mostra o resultado da análise elementar realizada na palha de arroz desta mesorregião (IFK, 2009).

Tabela 4.4 – Análise elementar da palha de arroz no sul do estado de Santa Catarina.

Palha	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cinza [%]	H <sub>2</sub> O [%]
Valor	14.689	13.338	39	5,31	34,3	0,71	0,2	12,9	7,58



Se comparada com as características do carvão, a palha de arroz apresenta menor poder calorífico. No entanto, do ponto de vista ambiental, sua utilização resulta viável, dado que, o  $\text{CO}_2$  liberado durante a combustão foi previamente absorvido durante a fotossíntese. Além disso, o conteúdo de enxofre e nitrogênio é inferior ao apresentado pelo carvão, o que contribui de forma positiva na geração de gases de impacto curto, como são os  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ . Também é importante mencionar que a utilização da palha de arroz para fins energéticos impede sua decomposição nas lavouras e, com isto, a consequente liberação de  $\text{CH}_4$ .

A análise exergética e ambiental da biomassa com fins energéticos implica a definição da rota tecnológica e dos diferentes processos envolvidos, desde a fonte do recurso até o ponto de consumo. A distância do transporte, assim como a característica do terreno onde será realizada a coleta da palha, tem papel fundamental na definição desta rota. A escolha do processo de adensamento depende basicamente da distância, assim, por exemplo, distâncias elevadas entre a produção e o consumo podem viabilizar o uso de técnicas como briquetagem e peletização, enquanto distâncias curtas favorecem outras técnicas de adensamento, como o enfardado, com base em Michelazzo e Braunbeck (2008).

Do mesmo modo como foi feito para a rota do carvão, a rota tecnológica para o aproveitamento da palha de arroz da lavoura até a entrada da usina foi dividida em três etapas, conforme ilustrado na Figura 4.12. Considerando as extensas áreas de arroz nas regiões vizinhas ao complexo termoeletrico, na primeira etapa, a técnica de adensamento selecionada é o enfardado, que ocorre na lavoura. O transporte da palha entre a lavoura e o complexo termoeletrico é feito por meio de caminhões. Na usina, os fardos são descarregados e processados, visando atingir a característica granulométrica necessária para o processo em combustão combinada carvão - biomassa. A seguir, são descritas cada uma das etapas identificadas para a rota da biomassa.

#### 4.1.3.1 Primeira etapa da rota da biomassa: processo na lavoura

Após a colheita do grão, a palha do arroz de aproximadamente metade da planta encontra-se já ceifada devido à colheita do grão (ver Figura 4.13a). A outra metade da planta ainda encontra-se ligada ao solo, não podendo ser retirada sem que haja uma operação de corte posterior. Esta operação é chamada de segamento e consiste em realizar um segundo corte, a uma altura próxima do solo, visando um maior

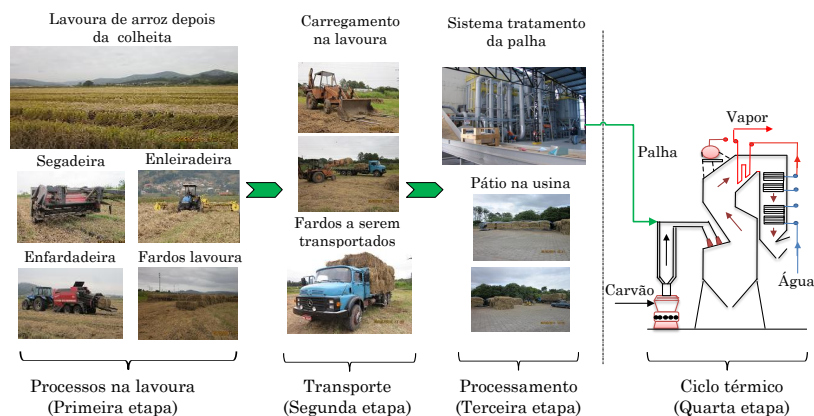


Figura 4.12 – Etapas definidas para a rota da biomassa.

aproveitamento da palha disponível em campo. Conforme visto na Figura 4.13b, a segadeira consiste em uma série de discos rotativos de corte alinhados que realizam o corte da planta. Este implemento é acoplado a um trator, e seus discos são movimentados por meio da tomada de força do mesmo.

Depois de segada, a palha se encontra dispersa no campo, necessitando ser agrupada em leiras. Esta operação, denominada enleiramento, é necessária para que se alcance maior produtividade durante o enfardamento. Como pode ser visto na Figura 4.13c, a enleiradeira é composta por dois carretéis giratórios que movimentam a palha em direção ao centro da máquina, formando a leira.

Após o enleiramento, a palha se encontra pronta para ser enfardada. O enfardado tem por objetivo adensar a palha, tornando seu transporte mais eficiente e prático. Assim como nos casos anteriores, a enfardadeira não possui tração própria, necessitando ser rebocada por um trator como visto nas Figuras 4.13d e 4.13e. Para esta aplicação foi optado pelo uso de enfardadoras de grande capacidade, produzindo fardos de até 400 kg. Segundo Jenkins *et al.* (2000), o rendimento de uma enfardadeira de fardos de 400 kg é da ordem de 15 t/h, dado que foi comprovado durante operação em campo.

Os fardos ficam dispersos, tendo de ser levados dos campos de arroz até um centro de carregamento para facilitar as ações de carre-

gamento dos caminhões usados para o transporte até a usina. Como visto na Figura 4.13f, a remoção dos fardos das quadras de arroz até o centro de carregamento é feita por meio do uso de tratores acoplados a plataformas de carregamento. A Tabela B.1 do Apêndice B mostra características do equipamento utilizado na lavoura.



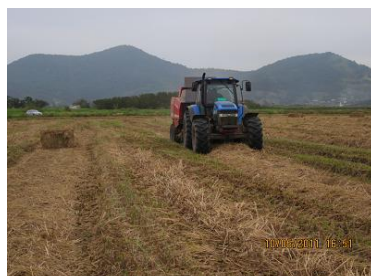
a. Campo após a colheita do arroz.



b. Segadeira.



c. Enleiradeira.



d. Enfardadeira.



e. Enfardadeira.



f. Carregamento fardos na lavoura.

Figura 4.13 – Equipamentos utilizados na lavoura.

#### 4.1.3.2 Segunda etapa da rota da biomassa: transporte lavoura - usina termoeétrica

O transporte dos fardos é realizado por caminhão. A coleta da palha é realizada a partir de três áreas em imediações do complexo termoeétrico como visto na Figura 4.14a. As Figuras 4.14b e 4.14c mostram aspectos do carregamento e descarregamento dos fardos de palha. As características dos caminhões utilizados podem ser vistas na Tabela B.2 do Apêndice B.



a. Áreas de coleta de palha de arroz.



b. Fardos sendo carregados na lavoura.



c. Fardos sendo descarregados na usina termoeétrica.

Figura 4.14 – Área selecionada e caminhões utilizados para o transporte.

#### 4.1.3.3 Terceira etapa da rota da biomassa: processamento

A terceira etapa consiste no sistema de processamento prévio à combustão (pré-combustão). Nesta etapa, os fardos que entram na usina termoelétrica devem ser submetidos a vários processos para atingir a granulometria requerida no processo de combustão. Para a implementação do processo de combustão combinada usando biomassa residual, é importante observar que um lugar no interior da usina deve ser destinado ao armazenamento dos fardos provenientes das lavouras para garantir a autonomia de operação do sistema.

Os fardos contam com dimensão aproximada de 1,2 m de largura, 0,9 m de altura, 2 m de comprimento e 354 kg de peso médio (ver Tabela B.4 do Apêndice B). Esses fardos entram ao sistema movimentados por um transportador de correias, que os leva até o desfardador, cuja função é desfazer o fardo e deixar a palha em um tamanho adequado para seu manuseio. Uma vez desfardada, a palha atravessa uma mesa vibratória, que elimina o material alheio à palha e que possa interferir ou deteriorar equipamentos utilizados nas operações subsequentes. A palha é ainda mais reduzida ao passar pelo ventilador picador, o qual garante seu transporte, através do sistema, até o ciclone e, posteriormente, aos moinhos picadores, onde finalmente a palha atinge a granulometria requerida pelo processo de combustão combinada. A palha pulverizada é transportada pneumáticamente até a tubulação que transporta o carvão já pulverizado, visando a pré-mistura dos dois combustíveis, antes da entrada à fornalha do gerador de vapor. A Figura 4.15 mostra a descrição gráfica das operações descritas anteriormente.

Cabe mencionar que são importantes nesse processo o sistema de despoeiramento composto por um ventilador e um filtro de mangas e o sistema para a secagem da palha, que utiliza o vapor da caldeira como fonte de calor. A Tabela B.3 do Apêndice B fornece a listagem dos equipamentos e dos consumos nominais desses sistemas.

Como resultado do reconhecimento visual da rota da palha, é proposto o fluxograma indicado na Figura 4.16, o qual mostra a inter-relação entre os processos com os fluxos considerados vitais em cada uma das etapas identificadas pela fronteira do problema, e serve de base para a elaboração do inventário de ciclo de vida do segundo cenário.

Uma vez definida a fronteira e identificados os processos relevantes, é possível executar o segundo passo da proposta metodológica, que consiste na análise exergética e ambiental do processo.

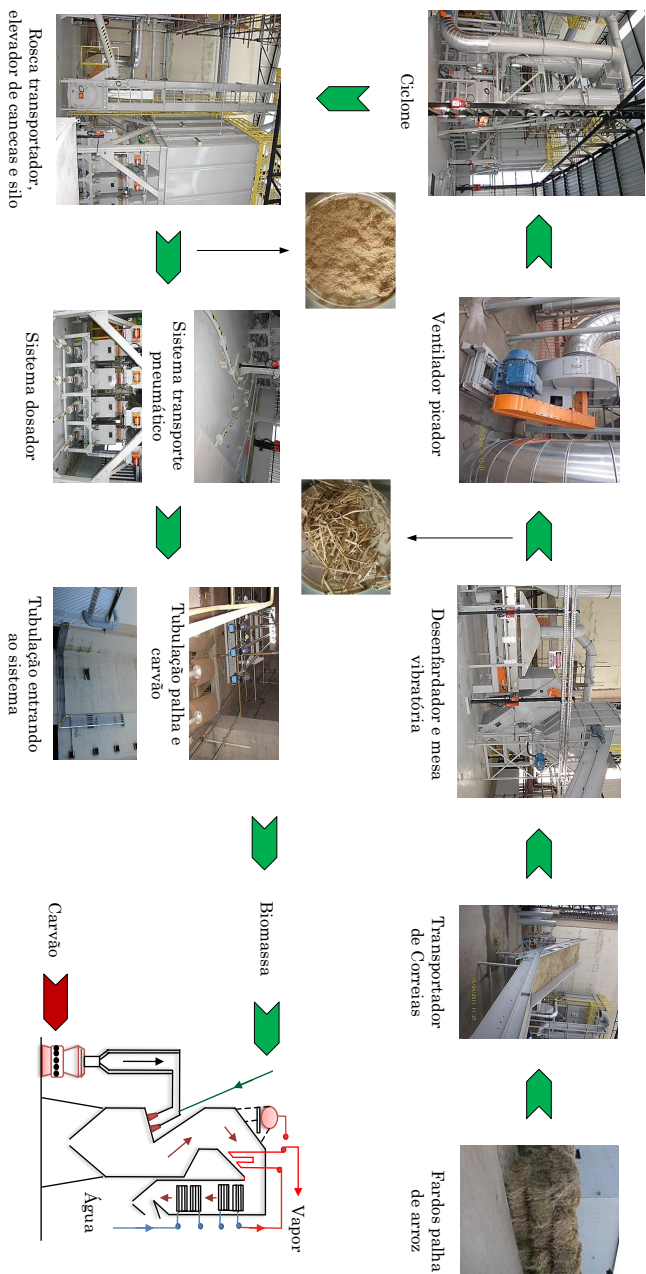


Figura 4.15 – Equipamentos para o processamento (pré-combustão) da palha de arroz.

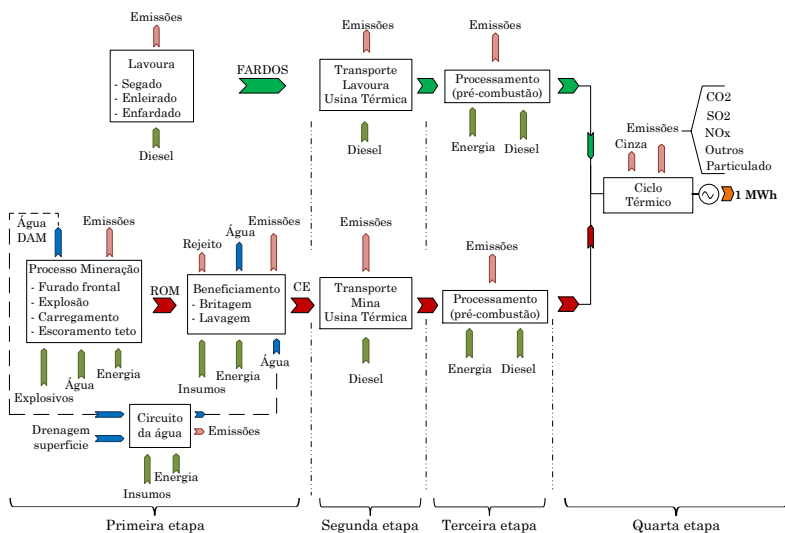


Figura 4.16 – Fluxograma proposto na avaliação do cenário B.

## 4.2 Passo 2: Análise exergética e ambiental

As análises exergética e ambiental são realizadas tendo em vista os dois cenários de interesse: operação atual 100% carvão (cenário A) e operação em combustão combinada 90% carvão e 10% biomassa (cenário B). Para cada cenário, primeiramente foi realizada a análise ambiental, dado que a informação do inventário do ciclo de vida (ICV) é utilizada na análise exergética.

### 4.2.1 Avaliação do cenário A: operação 100% carvão

Tomando como base o fluxograma da Figura 4.11 e a estrutura metodológica proposta no capítulo anterior, será apresentada a análise ambiental e exergética da usina termoeletrica em condição atual de operação 100% carvão.

#### 4.2.1.1 Análise ambiental

A análise ambiental é realizada em quatro fases, de acordo com o método de análise de ciclo de vida, consistindo em:

- (i) *Fase de definição de objetivo e escopo;*
- (ii) *Fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV);*
- (iii) *Fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV);*
- (iv) *Fase de interpretação dos resultados.*

Na fase de definição de objetivo e escopo, o objetivo é determinar o impacto ambiental do processo de geração termoeleétrica e quantificar a contribuição de cada uma das etapas definidas na fronteira. A categoria de impacto avaliada é a mudança climática, seguindo o modelo de caracterização proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC*). A Tabela 4.5 mostra detalhes da categoria de impacto e o modelo de caracterização utilizado (ISO/TR-14047, 2003).

Tabela 4.5 – Definição da categoria de impacto.

Termo	
Categoria de impacto	Mudança climática
Resultado do ICV	Quantidade de gás de efeito estufa por unidade funcional
Modelo de caracterização	Modelo para 100 anos do <i>IPCC</i>
Indicador de categoria	Aumento na radiação infravermelha ( $\text{W/m}^2$ )
Fator de caracterização	<i>GWP</i> para horizonte de tempo 100 anos para cada emissão de GEE $\text{CO}_2\text{-eq/kg}$ emissão
Pontos finais da categoria	Floresta, plantações, os recifes de coral

Na fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV), apesar de a fronteira do problema haver sido definida por quatro etapas, para o caso da avaliação do cenário A, o modelo de avaliação ambiental aqui proposto consiste em duas partes, como mostra a Figura 4.17. A primeira parte envolve o processo de mineração (primeira etapa da fronteira), cuja unidade funcional corresponde a 1 kg de carvão energético (CE).



A segunda parte considera as etapas de transporte e de processamento (pré-combustão) associadas à usina termoeletrica e define a unidade funcional como 1 MWh.

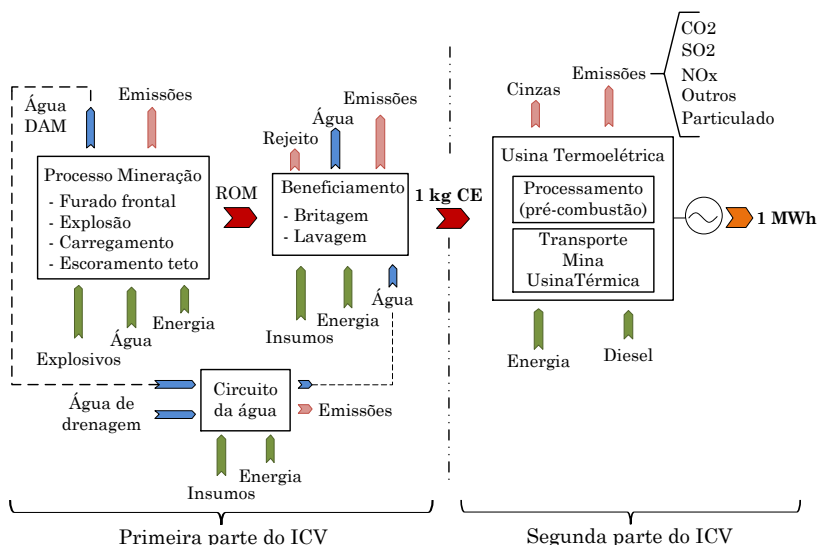


Figura 4.17 – Fluxograma do modelo de avaliação ambiental para o cenário A.

Para a primeira parte do inventário do ciclo de vida (Figura 4.17) do processo de mineração, são estimados os indicadores que relacionam os fluxos de entrada e saída com a unidade funcional, definida como 1 kg de carvão energético.

Para um ano de produção normal, a companhia mineradora opera em média 24 dias por mês, em jornadas de 16 horas por dia. Os dados são calculados tomando como base uma produção média mensal de 100.500 toneladas de carvão ROM, dos quais 42.000 toneladas correspondem a carvão energético (cf. Tabela A.9 do Apêndice A). Os indicadores foram estimados considerando as entradas identificadas, emissões ao ar e emissões à água, conforme apresentado a seguir:

(i) *Entradas identificadas:*

- *Carvão ROM*: de acordo com informações fornecidas pela com-

panhia mineradora, no ano de 2010, em média mensal, 41,8% do ROM corresponde a carvão energético, enquanto 58,2 % corresponde a rejeitos não comercializáveis, o que significa que para obter 1 kg de CE é necessário 2,39 kg de ROM. Assim:

$$I_{\text{ROM}} = \frac{1}{0,418} = 2,39 \text{ kg ROM/kg CE}$$

- *Água*: o processo de beneficiamento utiliza em média 765 m<sup>3</sup>/h de água, dos quais, 290 m<sup>3</sup>/h correspondem à água tomada da drenagem superficial, deste modo:

$$290 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 16 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 24 \frac{\text{dia}}{\text{mês}} = 111.360 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}}$$

$$I_{\text{água}} = \frac{111.360 \text{ m}^3/\text{mês}}{42.000.000 \text{ kg}/\text{mês}} = 2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg CE}$$

- *Drenagem ácida da mina (DAM)*: são bombeados da mina em média 475 m<sup>3</sup>/h. Assim:

$$475 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 16 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 24 \frac{\text{dia}}{\text{mês}} = 182.400 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}}$$

$$I_{\text{DAM}} = \frac{182.400 \text{ m}^3/\text{mês}}{42.000.000 \text{ kg}/\text{mês}} = 4,34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg CE}$$

- *Explosivos*: em média, mensalmente são utilizados 62,2 toneladas de explosivos. Assim, o indicador para a unidade funcional aqui considerada é:

$$I_{\text{exp}} = \frac{62.200 \text{ kg exp}/\text{mês}}{42.000.000 \text{ kg CE}/\text{mês}} = 1,48 \times 10^{-3} \text{ kg exp/kg CE}$$

- *Diesel*: aqui, é contabilizado o diesel utilizado por maquinaria e equipamentos na companhia mineradora. Tomando como base a média mensal de 64.050 litros, o indicador é:

$$64.050 \frac{\text{l}}{\text{mês}} \Leftrightarrow 64,05 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}}$$

$$\text{sendo } \rho_{\text{diesel}} = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow 64,05 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \times 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 54.442,5 \frac{\text{kg}}{\text{mês}}$$

logo, o indicador identificado em base ao CE será:

$$I_{\text{diesel}} = \frac{54.442,5 \text{ kg diesel}/\text{mês}}{42.000.000 \text{ kg CE}/\text{mês}} = 1,30 \times 10^{-3} \text{ kg diesel/kg CE}$$

O indicador em base energética é determinado a partir do  $PCI_{\text{diesel}}$  (41,8 MJ/kg), assim:

$$I_{\text{diesel}} = 5,42 \times 10^{-2} \text{ MJ/kg CE}$$

- *Eletricidade*: tomando como base a média anual fornecida pela companhia, o indicador associado a este portador energético no processo de mineração é:

$$I_{\text{eletricidade}} = \frac{1.937.685 \text{ kWh/mês}}{42.000.000 \text{ kg CE/mês}} = 4,61 \times 10^{-2} \text{ kWh/kg CE}$$

- *Cal extinta*: utilizada para o tratamento e neutralização da DAM. Tomando como base a vazão média da água utilizada na mina de  $765 \text{ m}^3/\text{h}$ , é possível calcular o indicador associado à quantidade de carvão energético da seguinte forma:

$$765 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 16 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 24 \frac{\text{dia}}{\text{mês}} = 293.760 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Como foi já mencionado, a cal extinta é usada na razão de  $0,5 \text{ kg/m}^3$ . Desse modo:

$$293.760 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \cdot 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 146.880 \text{ kg cal/mês}$$

$$I_{\text{cal}} = \frac{146.880 \text{ kg cal/mês}}{42.000.000 \text{ kg CE/mês}} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ kg cal/kg CE}$$

(ii) *Emissões ao ar*:

Durante a lavra, além do carvão mineral extraído, são liberadas emissões de gases tais como  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  cujas proporções dependem das características da camada de carvão. Partindo da informação apresentada por Kalkreuth *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2010), é proposto um valor de  $\dot{V} = 1,5 \text{ m}_{\text{gas}}^3/\text{t ROM}$ , dos quais 95% corresponde ao  $\text{CH}_4$  e os 5% restantes ao  $\text{CO}_2$ . Assim:

$$\dot{V}_{\text{CH}_4} = 1,425 \frac{\text{m}^3}{\text{t ROM}} \cdot 100.508 \frac{\text{t ROM}}{\text{mês}} = 143.223,9 \text{ m}^3/\text{mês}$$

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = 0,075 \frac{\text{m}^3}{\text{t ROM}} \cdot 100.508 \frac{\text{t ROM}}{\text{mês}} = 7.538,1 \text{ m}^3/\text{mês}$$

O indicador do  $\text{CH}_4$  relacionado ao carvão energético beneficiado é:

$$I_{CH_4} = \frac{143.223,9 \text{ m}^3/\text{mês}}{42.000.000 \text{ kg CE/mês}} = 3,41 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg CE}$$

Considerando a densidade do  $CH_4$  ( $\rho_{CH_4} = 0,717 \text{ kg/m}^3$ ), é possível obter o indicador em base mássica:

$$I_{CH_4} = 3,41 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg CE}} \cdot 0,717 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,44 \times 10^{-3} \text{ kg } CH_4/\text{kg CE}$$

da mesma forma para o  $CO_2$ , tem-se:

$$I_{CO_2} = \frac{7.538,1 \text{ m}^3/\text{mês}}{42.000.000 \text{ kg CE/mês}} = 1,79 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg CE}$$

com  $\rho_{CO_2} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ , o indicador em base mássica estará dado por:

$$I_{CO_2} = 1,79 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg CE}} \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,24 \times 10^{-4} \text{ kg } CO_2/\text{kg CE}$$

(iii) *Emissões à água:*

Com base nos resultados apresentados por Schneider (2006), foram estimados os indicadores do efluente final.

- Sólidos totais: o total de sólidos por kg de carvão energético é estimado em:

$$2.652 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \cdot \frac{1.000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \cdot 12.240 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 3,25 \times 10^{10} \frac{\text{mg}}{\text{dia}}$$

Considerando o tempo de operação mensal (24 dias/mês),

$$3,25 \times 10^{10} \frac{\text{mg}}{\text{dia}} \cdot \frac{24 \text{ dias}}{\text{mês}} = 7,80 \times 10^{11} \frac{\text{mg}}{\text{mês}}$$

$$\Rightarrow I_{s. \text{ totais}} = \frac{7,80 \times 10^{11} \text{ mg/mês}}{42.000.000 \text{ kg CE/mês}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1 \times 10^6 \text{ mg}} = 1,86 \times 10^{-2} \text{ kg/kg CE}$$

Seguindo o mesmo procedimento, obtém-se os indicadores para cada um dos elementos abaixo:

- Sulfatos:  $1.361 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \Leftrightarrow I_{\text{sulfatos}} = 9,52 \times 10^{-3} \text{ kg/kg CE}$ .
- Alumínio:  $0,77 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \Leftrightarrow I_{\text{aluminio}} = 5,38 \times 10^{-6} \text{ kg/kg CE}$ .
- Cobre:  $0,005 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \Leftrightarrow I_{\text{cobre}} = 3,50 \times 10^{-8} \text{ kg/kg CE}$ .
- Ferro:  $0,776 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \Leftrightarrow I_{\text{ferro}} = 5,43 \times 10^{-6} \text{ kg/kg CE}$ .

- Manganês:  $3,896 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \Leftrightarrow I_{\text{manganês}} = 2,73 \times 10^{-5} \text{ kg/kg CE.}$
- Zinco:  $0,14 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \Leftrightarrow I_{\text{aluminio}} = 9,79 \times 10^{-7} \text{ kg/kg CE.}$

A Tabela 4.6 resume o inventário do ciclo de vida do processo de mineração.

Tabela 4.6 – Inventário do ciclo de vida carvão energético. Unidade funcional: 1 kg de carvão.

Entradas	Quantidade	Unidade
Carvão ROM	2,39	kg
Água	$6,99 \times 10^{-3}$	m <sup>3</sup>
Explosivos	$1,48 \times 10^{-3}$	kg
Diesel	$5,42 \times 10^{-2}$	MJ
Elettricidade	$4,61 \times 10^{-2}$	kWh
Cal extinta	$3,5 \times 10^{-3}$	kg
Saídas		
Emissões ao ar		
CH <sub>4</sub>	$2,44 \times 10^{-3}$	kg
CO <sub>2</sub>	$2,24 \times 10^{-4}$	kg
Emissões à água		
Sólidos totais	$1,86 \times 10^{-2}$	kg
Sulfatos	$9,52 \times 10^{-3}$	kg
Alumínio	$5,38 \times 10^{-6}$	kg
Cobre	$3,50 \times 10^{-8}$	kg
Ferro	$5,43 \times 10^{-6}$	kg
Manganês	$2,73 \times 10^{-5}$	kg
Zinco	$9,79 \times 10^{-7}$	kg
Emissões ao solo		
Rejeitos	1,39	kg

O impacto ambiental devido aos fluxos entrando e saindo do processo, tais como explosivos, diesel, eletricidade e cal extinta, associados à categoria de impacto mudança climática, foram tomados de processos similares registrados na base de dados *Ecoinvent* no software SimaPro<sup>5</sup> 7.2 (*Faculty*), utilizado para a avaliação do impacto ambiental.

<sup>5</sup>SimaPro: ver [www.http://pre.nl/simapro-educational.htm](http://pre.nl/simapro-educational.htm)

Para a segunda parte do inventário do ciclo de vida (Figura 4.17), referente à usina termoeleétrica, são estimados os indicadores que relacionam os fluxos de entrada e saída com a unidade funcional, definida como 1 MWh de energia. Para a elaboração do inventário de ciclo de vida da usina termoeleétrica no cenário A, foi realizado um modelo de avaliação fundamentado na primeira e segunda lei da termodinâmica, a partir dos dados de operação indicados na Tabela 4.1. O Apêndice C mostra o modelo de avaliação do ciclo termodinâmico da usina. Os resultados indicaram que a eficiência térmica da usina, para uma potência de 45,8 MWe, é de 30%, o que gera um consumo específico de combustível de 660,3 kg de carvão por MWe gerado (1 MWh  $\Leftrightarrow$  3.600 MJ). A elaboração do inventário de ciclo de vida foi realizada considerando o sistema operando em regime permanente durante todo o ano. Os indicadores foram estimados considerando às entradas identificadas, emissões ao ar e emissões ao solo, conforme apresentado a seguir:

(i) *Entradas identificadas:*

- *Carvão energético:* tomando como base a eficiência termodinâmica para a geração de 1 MWh, são requeridos 660,3 kg de carvão energético:

$$I_{CE} = 660,3 \text{ kg CE/MWh}$$

- *Transporte em trem:* a distância considerada para o transporte em trem é de 80 km, do centro de armazenagem do carvão até o pátio do complexo termoeletrico. No inventário de ciclo de vida, a unidade utilizada para definir a atividade de transporte em relação à unidade fundamental é tkm<sup>6</sup>. Assim:

$$660,3 \text{ kg} \cdot 80 \text{ km} = 52,8 \text{ tkm} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)}$$

$$I_{\text{trem}} = 105,6 \text{ tkm/MWh}$$

- *Transporte em caminhão:* a distância considerada é de 20 km, desde a usina de beneficiamento até o centro de armazenagem. Logo:

$$660,3 \text{ kg} \cdot 20 \text{ km} = 13,2 \text{ tkm} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)}$$

---

<sup>6</sup>tkm: consiste na unidade de medida correspondente ao transporte de 1 tonelada ao longo de 1 km.

$$I_{\text{caminhão}} = 26,4 \text{ tkm/MWh}$$

Ambas as modalidades de transporte foram penalizadas ao considerar a mesma quantidade de tkm para a volta, tendo em vista que tanto caminhões como vagões retornam vazios, o que reduz o consumo.

- *Eletricidade*: este portador consiste na eletricidade utilizada por equipamentos na usina termoeletrica, que foi obtido do sistema de monitoramento e do inventário realizado em campo. O valor estimado é de 7% do total gerado pela usina:

$$I_{\text{eletricidade}} = 0,07 \text{ MWh/MWh}$$

- *Diesel*: aqui, é contabilizado o diesel utilizado por maquinaria e equipamentos na usina termoeletrica. Tomando como base o dado fornecido pelo pessoal na usina de 120 l/h, tem-se:

$$120 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ l}} = 0,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{sendo } \rho_{\text{diesel}} = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow 0,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 102 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

logo, o indicador identificado em base à unidade funcional definida será:

$$I_{\text{diesel}} = \frac{102 \text{ kg diesel}}{45,8 \text{ MWh}} = 2,23 \text{ kg diesel/MWh}$$

O indicador em base energética pode ser determinado a partir do  $\text{PCI}_{\text{diesel}}$  (41,8 MJ/kg diesel):

$$I_{\text{diesel}} = 93,2 \text{ MJ/MWh}$$

(ii) *Emissões ao ar*:

Os indicadores para as emissões ao ar foram obtidas mediante o modelo de combustão apresentado no Apêndice E. Os valores registrados para o material particulado são propostos a partir dos dados registrados no *Ecoinvent* para casos similares e estão expostos abaixo:

$$I_{\text{CO}_2} = 1.116 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{SO}_2} = 15,3 \text{ kg SO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{CO}} = 6,6 \times 10^{-5} \text{ kg CO}/\text{MWh}$$

$$I_{\text{NO}_2} = 8,1 \times 10^{-3} \text{ kg NO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{N}_2\text{O}} = 8,2 \times 10^{-5} \text{ kg NO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{CH}_4} = 8,3 \times 10^{-33} \text{ kg CH}_4/\text{MWh}$$

$$I_{\text{particulado } < 2,5 \mu\text{m}} = 10,2 \text{ kg}/\text{MWh}$$

$$I_{\text{particulado } > 10 \mu\text{m}} = 2,53 \text{ kg}/\text{MWh}$$

$$I_{\text{particulado } > 2,5 \mu\text{m, e } < 10 \mu\text{m}} = 1,19 \text{ kg}/\text{MWh}$$

(iii) *Emissões ao solo:*

- *cinzas pesadas:* segundo informações fornecidas no complexo termoeletrico, as cinzas pesadas representam 20% do total das cinzas presentes no carvão:

$$I_{\text{cinzas pesadas}} = 55,3 \text{ kg}/\text{MWh}$$

A Tabela 4.7 resume o inventário de ciclo de vida do processo de geração no cenário A (ver pag. 87).

A terceira fase, correspondente à avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), pela natureza do processo de geração termoeletrica e dos cenários em consideração, a categoria de impacto analisada foi a de mudança climática em que o fator de caracterização corresponde ao índice sugerido pelo *IPCC Global Warming Potential (GWP)*, avaliado para um horizonte de 100 anos. O *GWP* é um fator de caracterização que relaciona o impacto de um gás a um número que toma como base o impacto gerado pelo  $\text{CO}_2$ . Desta forma, para o horizonte de tempo considerado, o *GWP* tem um valor de 1 para o  $\text{CO}_2$ , de 25 para o  $\text{CH}_4$  e de 298 para o  $\text{N}_2\text{O}$  (IPCC, 2007). O resultado obtido é dado em kg de  $\text{CO}_2$  equivalentes ( $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ ) por unidade funcional.

Para o cálculo do impacto associado à unidade funcional, foi usado o software SimaPro, que consiste em uma ferramenta computacional reconhecida para a avaliação e análise do impacto ambiental associado a produtos ou processos. O SimaPro conta com uma extensa base



de dados denominada *Ecoinvent*, que cobre um número importante de processos, a partir da qual foram estimados alguns dos dados apresentados no ICV. Outras categorias de impacto, tais como acidificação, ecotoxicidade ou esgotamento da camada de ozônio, poderiam ter sido avaliadas a partir do ICV realizado durante a pesquisa.

Finalmente a quarta fase corresponde à interpretação dos resultados. O modelo ambiental indicou uma emissão de 1.230 kg de  $\text{CO}_2\text{-eq}$  por MWh, dos quais 1.120  $\text{CO}_2\text{-eq}$  são associados à usina termoeletrica. Como indicado na Figura 4.18, a usina termoeletrica responde por 91% do total de  $\text{CO}_2\text{-eq}$ , seguido pelo processo de mineração com 4,6%. As etapas correspondentes ao transporte e ao processamento (pré-combustão) respondem por 4,4%. A seção 4.3 apresenta maiores informações relacionadas aos resultados do cenário A.

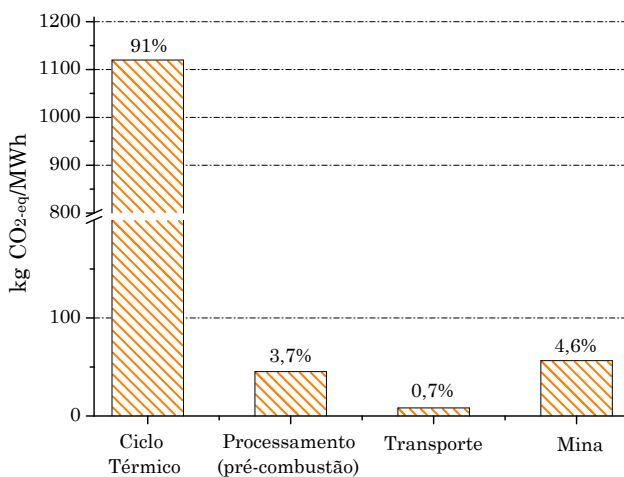


Figura 4.18 – Emissão de  $\text{CO}_2\text{-eq}$  por MWh no cenário A.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que o valor da emissão registrado para a usina termoeletrica é alto, correspondendo aos valores previamente apresentados em outros estudos (ver Tabela 2.1 do Capítulo 2). Este valor está diretamente relacionado à eficiência termodinâmica da usina, que, para o caso aqui analisado, é de 30% (ver Apêndice C). A seção 4.3.1.2 amplia a discussão em torno da análise

ambiental. O Apêndice D mostra o resultado obtido a partir do modelo proposto para a categoria de impacto denominada acidificação, analisando os dois cenários: operação atual 100% carvão e combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa.

#### 4.2.1.2 Análise exergética

A análise exergética foi realizada seguindo as pautas apresentadas na Seção 3.2.2.2 da proposta metodológica e a fronteira definida na Figura 4.11. Para o cenário analisado, o ponto de início do processo foi localizado antes da entrada dos queimadores. Fazendo uso das Equações 3.1, 3.2 e 3.3, o valor da fonte exergética calculado foi de 162,7 MW (ver Apêndice C).

##### *Primeira etapa: processo de mineração*

A primeira etapa da fronteira corresponde aos processo de mineração e beneficiamento do carvão energético. Apesar da complexidade dos processos envolvidos, foram identificados como vitais somente dois portadores energéticos: a eletricidade e o diesel.

Tomando como base o ICV previamente elaborado, para o caso da eletricidade consumida, considera-se que, por cada kg de CE, são requeridos 0,0461 kWh de energia. O modelo termodinâmico indicou que, para a eficiência da usina e em operação contínua (24 h/dia, 30 dias/mês), o consumo de carvão energético é de 8,4 kg/s. Assim, é possível determinar a potência elétrica consumida durante a etapa de mineração:

$$\dot{E}_{\text{eletricidade}} = I_{\text{eletricidade}} \times [\dot{m}_c \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}}] = 1,40 \text{ MW}$$

Para o caso do diesel, o ICV apresentou um índice de  $1,3 \times 10^{-3}$  kg de diesel por cada kg de carvão energético obtido durante o processo de mineração. Assim, o fluxo mássico de diesel pode ser obtido como:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = I_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{carvão}} = 1,09 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Assim, como indicado na proposta metodológica, considera-se uma máquina térmica com uma eficiência equivalente à usina termoeleétrica ( $\eta_{eq} = 30\%$ ). O valor calculado a partir da equação (3.5) é:

$$\dot{E}_{\text{eq-diesel}} = \text{PCI}_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{eq}} = 0,14 \text{ MW}$$

Portanto, considera-se que o total de energia correspondente à exergia destruída é de 1,55 MW. Aqui, o valor anterior é arredondado para 1,6 MW.

### *Segunda etapa: transporte*

A segunda etapa definida na fronteira corresponde ao transporte do carvão entre a mina e o pátio da usina termoeletrica. O principal portador energético é o diesel consumido pelos caminhões e trens. Considerando o histórico anual apresentado no Apêndice A, a relação entre consumo e carvão transportado é de 0,57 litros de combustível por tonelada de carvão movimentada. Assim:

$$0,57 \frac{1}{\text{t CE}} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)} = 1,14 \frac{1}{\text{t CE}}$$

$$\therefore 1,14 \frac{1}{\text{t CE}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ t}}{1.000 \text{ kg}} \right] = 1,14 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{kg CE}}$$

Lembrando que o fluxo de carvão consumido pela usina é da ordem de 8,4 kg/s e a  $\rho_{\text{diesel}} = 850 \text{ kg/m}^3$ , obtém-se o seguinte valor para o fluxo mássico do combustível:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = 1,14 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{kg}} \cdot 8,4 \frac{\text{kg CE}}{\text{s}} = 9,58 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot \left[ \frac{1 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1} \cdot 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 8,14 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Portanto, o valor identificado como equivalente exergético associado ao portador diesel durante a etapa de transporte corresponde a:

$$\dot{E}_{\text{eq-diesel}} = \text{PCI}_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{eq}} = 0,1 \text{ MW}$$

### *Terceira etapa: processamento (pré-combustão)*

Na terceira etapa, o principal portador energético identificado é a eletricidade utilizada nos processos internos na usina termoeletrica (esteiras transportadoras, moinhos, ventiladores entre outros). Também se apresenta com menor intensidade consumo de diesel para a movimentação do carvão no pátio da usina.

O consumo de eletricidade desta etapa foi obtido através do trabalho de campo e do sistema de monitoramento da usina. O consumo interno corresponde a 7% do total gerado; e o total inventariado das esteiras transportadoras que servem à usina foi de 400 kW (ver Apêndice A). Com base nesses dados, é proposto um valor de 3,6 MW.

Os resultados obtidos para a rota do carvão são relativamente baixos, se comparados com os 162,7 MW calculados para a fonte exergética. O resultado apresentado no Apêndice C indica que a etapa correspondente à usina termoe elétrica é a maior destruidora de exergia, correspondendo a 116,9 MW, o que ocorre, principalmente, durante o processo de combustão no gerador de vapor. A rota do carvão responde por apenas 5,3 MW. A Figura 4.19 mostra a razão de destruição de exergia do primeiro cenário com as considerações aqui apresentadas.

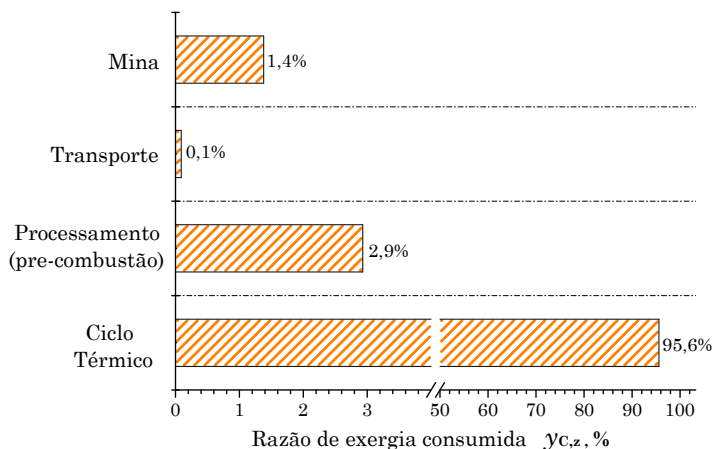


Figura 4.19 – Razão de exergia consumida no cenário A.

#### 4.2.2 Avaliação do cenário B: operação em combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa

Da mesma forma que no cenário A, a avaliação do cenário B baseou-se no fluxograma da Figura 4.16 e na proposta metodológica apresentada no Capítulo 3.

## 4.2.2.1 Análise ambiental

Na fase de definição de objetivo e escopo, o objetivo é determinar o impacto ambiental do processo de geração termoeletrica operando em combustão combinada e identificar a contribuição de cada uma das etapas definidas na fronteira, considerando a categoria de impacto avaliada no cenário A (mudança climática).

Na fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV), como pode-se ver na Figura 4.20, o modelo de avaliação ambiental consiste em duas partes: a primeira corresponde ao processo de mineração (já analisado no cenário A) e a segunda considera as etapas de transporte e processamento de pré-combustão do carvão e as etapas definidas para a rota da biomassa, anexa à usina termoeletrica. A integração da rota da biomassa à usina termoeletrica é possível dado que o principal portador energético utilizado nas etapas 1 e 2 (processos na lavoura e transporte da biomassa) é o diesel.

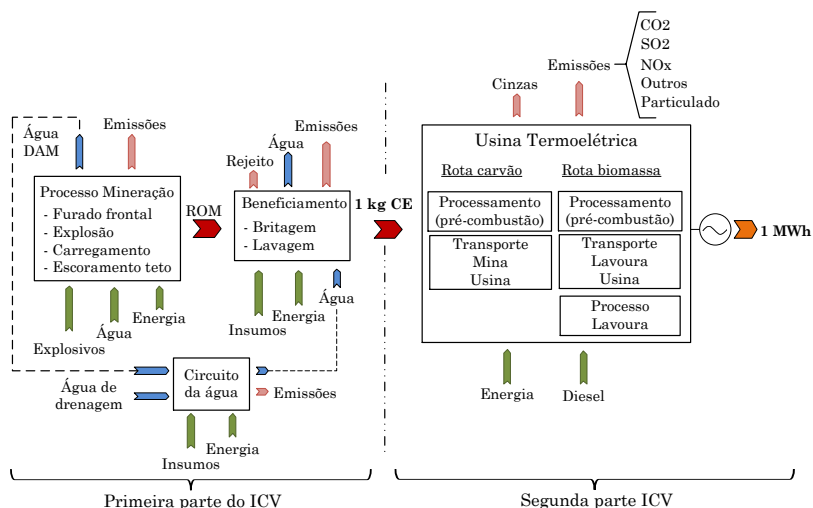


Figura 4.20 – Fluxograma do modelo de avaliação ambiental para o cenário B.

A seguir, é apresentado o inventário de ciclo de vida correspondente à segunda parte. O inventário da primeira parte, já elaborado para o cenário A, é válido para o cenário B.

Para a segunda parte do inventário do ciclo de vida (Figura 4.20), são estimados os indicadores que relacionam os fluxos de entrada e saída com a unidade funcional definida como 1 MWh de energia. Esses indicadores foram estimados considerando as entradas identificadas, emissões ao ar, emissões ao solo e produtos evitados. Nota-se que para o caso de operação em combustão combinada, o modelo de avaliação termodinâmica apresentado no Apêndice C considera uma perda na eficiência da caldeira de 0,5% por cada 10% de biomassa entrando ao processo de combustão em base energética, valor que foi proposto a partir do informe técnico da EPRI (1999). A elaboração do inventário de ciclo de vida foi realizado considerando que o sistema está operando em regime permanente durante todo o ano.

(i) *Entradas identificadas:*

O inventário aqui apresentado corresponde ao caso em que o carvão responde por 90% e a biomassa por 10% da energia do sistema.

- *Carvão energético:* considerando a eficiência termodinâmica identificada para o segundo cenário, para a geração de 1 MWh, são requeridos 597,4 kg de carvão energético e 90,4 kg de biomassa. Observa-se que o total de kg supera o valor de 660,4 kg registrado no cenário A, o que ocorre devido à diferença entre o PCI dos combustíveis. Assim:

$$I_{CE} = 597,4 \text{ kg CE/MWh}$$

Para a biomassa, tem-se:

$$I_{\text{biomassa}} = 90,4 \text{ kg biomassa/MWh}$$

- *Transporte:* para o carvão sendo transportado, o procedimento é similar ao já apresentado para o cenário A (transporte em trem e caminhão), no entanto, muda a quantidade a ser transportada, dado que a contribuição energética do carvão é menor.

*Transporte do carvão em trem:* a distância considerada para o transporte por trem é de 80 km, desse modo:

$$597,4 \text{ kg} \cdot 80 \text{ km} = 47,8 \text{ tkm} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)}$$

$$I_{\text{trem}} = 95,6 \text{ tkm/MWh}$$

*Transporte do carvão em caminhão:* a distância considerada é de 20 km, assim:

$$597,4 \text{ kg} \cdot 20 \text{ km} = 11,9 \text{ tkm} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)}$$

$$I_{\text{caminhao}} = 23,8 \text{ tkm/MWh}$$

*Transporte da biomassa em caminhão:* para a biomassa, o transporte é realizado em caminhão. Considerando as características da mesorregião em estudo, é proposta uma distância média de 50 km para o transporte da mesma:

$$90,4 \text{ kg} \cdot 50 \text{ km} = 4,5 \text{ tkm} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)}$$

$$I_{\text{caminhao}} = 9 \text{ tkm/MWh}$$

Novamente, ambas as modalidades de transporte foram penalizadas ao considerar a mesma quantidade de tkm para a volta, tendo em vista que tanto caminhões como vagões retornam vazios, o que reduz o consumo.

- *Elettricidade:* Neste cenário, a eletricidade corresponde à utilizada por equipamentos na usina termoeletrica, conforme foi apresentado no cenário A, e ao consumo de eletricidade dos equipamentos na terceira etapa da rota da biomassa (ver Apêndice B).

*Elettricidade referente à rota do carvão:* para o caso do carvão, o índice corresponde ao calculado no primeiro cenário:

$$I_{\text{eletricidade}} = 0,07 \text{ MWh/MWh}$$

*Elettricidade referente à rota da biomassa:* a rota da biomassa apresenta consumo de eletricidade na terceira etapa. A partir do inventário dos equipamentos, é contabilizada uma potência nominal de aproximadamente 0,5 MW, o que equivale a 1,01% do total da energia gerada. Assim:

$$I_{\text{eletricidade}} = 0,01 \text{ MWh/MWh}$$

- *Diesel*: para o caso da rota do carvão, é considerado o diesel utilizado por maquinaria e equipamentos associados à dita rota no interior da usina termoeleétrica (referente à terceira etapa da rota do carvão). Para o caso da rota da biomassa, esta fonte energética é importante para os processos na lavoura cujos equipamentos operam a diesel (referente à primeira etapa da rota da biomassa). O diesel relacionado à etapa de transporte foi indicado anteriormente.

*Diesel referente à rota do carvão*: tomando como base a média horária fornecida pelo pessoal na usina de 120 l/h, tem-se:

$$120 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ l}} = 0,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{sendo } \rho_{\text{diesel}} = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow 0,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 102 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Logo, o indicador identificado em relação à unidade funcional definida será:

$$I_{\text{diesel}} = \frac{102 \text{ kg diesel}}{45,8 \text{ MWh}} = 2,23 \text{ kg diesel/MWh}$$

O indicador em base energética pode ser determinado a partir do  $\text{PCI}_{\text{diesel}}$  (41,8 MJ/kg diesel):

$$I_{\text{diesel}} = 93,2 \text{ MJ/kg CE}$$

*Diesel referente à rota da biomassa*: aqui, é obtido o indicador para o caso do diesel associado aos processos na lavoura descritos na Seção 4.1.3.1. A operação em combustão combinada, que utiliza até 10% de biomassa em base energética, requer 4.121 kg de biomassa por hora (considerando o  $\text{PCI}_{\text{biomassa}} = 13.338 \text{ kJ/kg}$ ), ou 99 toneladas por dia.

A coleta da biomassa foi realizada com os equipamentos descritos no Apêndice B (três tratores de alto porte e seis de médio porte). Em média, diariamente, foram obtidos 87 fardos de biomassa de 354 kg cada, o que corresponde a 30,8 toneladas. Para atingir a meta de 99 toneladas diárias (280 fardos/dia), seria necessário aumentar 3,2 vezes a quantidade desses equipamentos.

Tratores de alto porte apresentam um consumo de 16 l/h, enquanto os de médio porte consomem, aproximadamente, 9 l/h. Assim, para a obtenção do indicador associado ao consumo de diesel, é proposto um fator correspondente a 4 vezes os valores



dos equipamentos utilizados durante o mês de coleta de biomassa, o que totaliza 12 tratores de alto porte e 24 de médio porte. Os consumos estimados de diesel foram calculados para um período de operação de 8 h/dia, conforme apresentado a seguir:

$$12 \text{ tratores grandes} \cdot 16 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = 1.536 \frac{\text{l}}{\text{dia}}$$

igualmente,

$$24 \text{ tratores médios} \cdot 9 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = 1.728 \frac{\text{l}}{\text{dia}}$$

logo, o total de diesel consumido por dia é de 3.264 l. Assim o indicador associado com dita fonte energética será:

$$3.264 \frac{\text{l}}{\text{dia}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{285 \text{ fardos}} = 11,5 \frac{\text{l}}{\text{fardo}} \Leftrightarrow 3,23 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Lembrando que  $\rho_{\text{diesel}} = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , o indicador em base mássica será:

$$3,23 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,74 \times 10^{-2} \frac{\text{kg diesel}}{\text{kg biomassa}}$$

$$I_{\text{diesel}} = 2,74 \times 10^{-2} \frac{\text{kg diesel}}{\text{kg biomassa}} \cdot 90,4 \frac{\text{kg biomassa}}{\text{MWh}} = 2,48 \text{ kg/MWh}$$

e, em base energética com  $\text{PCI}_{\text{diesel}}$  (41,8 MJ/kg diesel), será:

$$I_{\text{diesel}} = 103,7 \text{ MJ/MWh}$$

(ii) *Emissões ao ar:*

Os indicadores para as emissões ao ar do cenário B, foram igualmente estimadas a partir do modelo de combustão proposto no Apêndice E.

$$I_{\text{CO}_2} = 990 \text{ kg CO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{SO}_2} = 13,6 \text{ kg SO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{CO}} = 6,9 \times 10^{-5} \text{ kg CO/MWh}$$

$$I_{\text{NO}_2} = 7,9 \times 10^{-3} \text{ kg NO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{N}_2\text{O}} = 8,1 \times 10^{-5} \text{ kg NO}_2/\text{MWh}$$

$$I_{\text{CH}_4} = 1,1 \times 10^{-32} \text{ kg CH}_4/\text{MWh}$$

O Apêndice E mostra que, para a operação em combustão combinada (90% carvão - 10% biomassa), foram estimados 1.140 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh, superando o valor de 1.116 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh, registrado para o cenário A. Nota-se que somente a parcela relativa à queima do carvão está sendo considerada para o inventário, baseando-se no fato de que os kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh gerados pela queima da biomassa foram sequestrados na fotossíntese, durante o crescimento da planta. Os indicadores do material particulado foram mantidos iguais ao do cenário A devido à falta de informação a respeito.

$$I_{\text{particulado } < 2,5 \mu\text{m}} = 10,2 \text{ kg/MWh}$$

$$I_{\text{particulado } > 10 \mu\text{m}} = 2,53 \text{ kg/MWh}$$

$$I_{\text{particulado } > 2,5 \mu\text{m, e } < 10 \mu\text{m}} = 1,19 \text{ kg/MWh}$$

(iii) *Emissões ao solo:*

- *Cinzas pesadas:* segundo a informação fornecida no complexo termoeletrico, as cinzas pesadas representam 20% do total das cinzas presentes no carvão.

$$I_{\text{cinzas pesadas}} = 50 \text{ kg/MWh}$$

(iv) *Produtos evitados:*

A utilização da biomassa residual como combustível alternativo na usina termoeletrica durante a operação em combustão combinada evita a decomposição microbiana da biomassa nas lavouras e, com isso, dificulta a liberação de gases importantes para a categoria de impacto avaliada, como CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, entre outros. Vários trabalhos apresentam indicadores relacionados a esses gases, considerando o período sazonal. Com relação ao CH<sub>4</sub>, Eberhardt *et al.* (2009), por exemplo, propõem valores entre 55 e 62 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>. Segundo o relatório de referência elaborado por Lima, Pessoa e Ligo (2006), que trata de emissões de CH<sub>4</sub> do cultivo de arroz, é sugerido que, na ausência de valores para o fator de emissão em campos de arroz inundados no Brasil, seja utilizado o valor médio de 20 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>. Pode-se observar portanto o alto grau de incerteza em torno desses tipos de indicadores.

Nem todo o carbono presente na biomassa é liberado à atmosfera em forma de  $\text{CH}_4$ , devido a que uma parte é transferida ao solo e outra é oxidada pelas baterias aeróbicas, de acordo com Agostinetti *et al.* (2002). Considerando isso, para a obtenção dos indicadores, é proposto que 50% do carbono presente na biomassa seja incorporado ao solo, e que 50% seja liberado à atmosfera em forma de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$ , com as seguintes proporções: para 1 kg de palha que contém 39% de carbono (ver Tabela 4.4), indica-se uma quantidade de 0,39 kg referente ao carbono. Neste caso, se 50% for incorporado ao solo, sobram 0,195 kg de carbono por kg de palha. As proporções propostas para emissões evitadas são de 40%  $\text{CH}_4$ , 30% de  $\text{CO}_2$  e 30% de  $\text{CO}$ . Assim:

$$I_{\text{CH}_4} \text{ evitado} \Rightarrow 0,195 \text{ kg Carbono} \cdot 40\% = 0,078 \text{ kg CH}_4/\text{kg palha}$$

$$I_{\text{CO}_2} \text{ evitado} \Rightarrow 0,195 \text{ kg Carbono} \cdot 30\% = 0,058 \text{ kg CO}_2/\text{kg palha}$$

$$I_{\text{CO}} \text{ evitado} \Rightarrow 0,195 \text{ kg Carbono} \cdot 30\% = 0,058 \text{ kg CO/kg palha}$$

Segundo os dados registrados na Tabela B.4, durante a coleta da biomassa foram necessários  $2 \text{ m}^2$  para a obtenção de 1 kg de palha, o que corresponde, considerando o valor proposto para a emissão evitada de  $\text{CH}_4$ , à ordem de grandeza referenciada anteriormente.

A Tabela 4.7 resume o inventário do ciclo de vida do processo de geração termoeletrica para os dois cenários avaliados: cenário A - 100% carvão e cenário B - 90% carvão e 10% biomassa. Da mesma forma que para o inventário de ciclo de vida do processo de mineração, o impacto ambiental devido aos fluxos considerados relevantes foram tomados de processos similares, registrados na base de dados *Ecoinvent* do software SimaPro. Já as emissões associadas à queima dos combustíveis, foram estimadas a partir do modelo de combustão de equilíbrio químico apresentado no Apêndice E.

Na terceira fase, correspondente à avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), foi realizada uma análise similar ao caso do cenário A. Por meio do programa SimaPro, avalia-se a categoria de impacto denominada mudança climática, mediante o índice *Global Warming Potential* (GWP), que considera um horizonte de tempo de 100 anos para cada emissão de efeito estufa, com base na unidade funcional previamente definida.

Tabela 4.7 – Inventário do ciclo de vida usina termoeleétrica. Unidade funcional: 1 MWh.

Entradas	Cenário A [100% Carvão]	Cenário B [10% Biomassa]	Unidade
Carvão energético	660,3	597,4	kg
Biomassa	0	90,4	kg
Transporte trem	105,6	95,6	tkm
Transporte Caminhão	26,4	32,8	tkm
Elettricidade	$7,0 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-2}$	MWh
Diesel	93,2	196,9	MJ
Saídas			
Emissões ao ar			
CO <sub>2</sub>	1.116	990	kg
CO	$6,6 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-5}$	kg
CH <sub>4</sub>	$8,3 \times 10^{-33}$	$1,1 \times 10^{-32}$	kg
SO <sub>2</sub>	15,3	13,6	kg
N <sub>2</sub> O	$8,2 \times 10^{-5}$	$8,1 \times 10^{-5}$	kg
NO <sub>2</sub>	$8,1 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-3}$	kg
Particulado < 2,5 $\mu$ m	10,2	10,2	kg
Particulado > 10 $\mu$ m	2,53	2,53	kg
Particulado > 2,5 < 10 $\mu$ m	1,19	1,19	kg
Emissões ao solo			
Cinzas pesadas	55,3	50	kg
Emissões evitadas <sup>a</sup>			
CH <sub>4</sub>		0,078	kg
CO <sub>2</sub>		0,058	kg
CO		0,058	kg

<sup>a</sup>Valor estimado pela não decomposição da biomassa na lavoura.

Finalmente, na quarta fase correspondente à interpretação dos resultados, o modelo ambiental indicou uma emissão de 1.253 kg de CO<sub>2-eq</sub> por MWh, dos quais 990 CO<sub>2-eq</sub> são associados à parcela de carvão queimada na usina termoeleétrica. Já a parcela da biomassa foi quantificada como 150 CO<sub>2-eq</sub>. Como indicado na Figura 4.21, a usina termoeleétrica responde por 90,9% do total de CO<sub>2-eq</sub>. Os processos de processamento (pré-combustão) e de mineração respondem por 4,1% e 4,0 %, respectivamente. As etapas relativas ao transporte, tanto do carvão quanto da biomassa, e aos processos na lavoura são pouco representativas, equivalendo a 1%.

O valor registrado para a emissão evitada por decomposição microbiana da biomassa no campo foi de 182 CO<sub>2-eq</sub> por MWh, o que representa um valor importante, se comparado, por exemplo, com o impacto associado aos processos de mineração. Se for subtraído do valor total 1.103 CO<sub>2-eq</sub> por MWh, pode-se concluir que o valor líquido do impacto ambiental, para a categoria avaliada, é de 921 CO<sub>2-eq</sub> por MWh, o que representa uma redução próxima a 34% do valor do impacto para o caso de operação padrão. A Seção 4.3.2.2 amplia a discussão dos resultados.

O Apêndice D mostra o resultado obtido a partir do modelo proposto e dos inventários de ciclo de vida apresentados para a categoria de impacto de acidificação.

#### 4.2.2.2 Análise exergética

Nesta seção, é apresentado o procedimento seguido para a análise exergética do cenário B. Da mesma forma que no caso do cenário A, são seguidas as pautas sugeridas na Seção 3.2.2.2 da estrutura metodológica e as etapas identificadas no fluxograma da Figura 4.16.

Para operação em combustão combinada (90% carvão - 10% biomassa), os fluxos de massa do carvão e da biomassa são de 7,6 e 1,15 kg/s, respectivamente (ver Apêndice C). O valor da fonte exergética calculado foi de 165,4 MW. Diferentemente do cenário A, esse valor é explicado devido à perda de eficiência assumida pelo modelo, quando o sistema opera em combustão combinada (ver Seção 4.2.2.1).

##### *Primeira etapa: Obtenção de carvão e biomassa:*

A primeira etapa envolve os processos para a obtenção da biomassa na lavoura e de mineração na obtenção do carvão energético, como pode ser visto na Figura 4.16. O ICV elaborado para o cenário B indicou que a eletricidade consumida durante o processo de mineração é de 0,0461 kWh por cada kg de CE. O modelo termodinâmico mostrou que, em operação contínua (24 h/dia, 30 dias/mês), o consumo de carvão energético é de 7,6 kg/s. Assim, a potência elétrica consumida durante a etapa de mineração é:

$$\dot{E}_{\text{eletricidade}} = I_{\text{eletricidade}} \cdot \dot{m}_c \cdot \left[ \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right] = 1,26 \text{ MW}$$

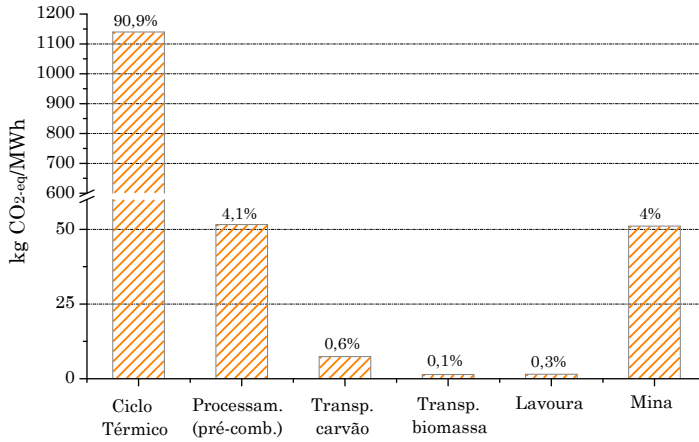


Figura 4.21 – Emissão de CO<sub>2</sub>-eq por MWh emitidos no cenário B.

Para o caso do diesel, o índice apresentado no ICV é de  $1,30 \times 10^{-3}$  kg diesel/kg CE. A partir desse índice é possível estimar o fluxo mássico e, com isso, o valor exergético equivalente seguindo o indicado na Equação 3.5.

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = I_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{carvão}} = 9,88 \times 10^{-3} \frac{\text{kg diesel}}{\text{s}}$$

Assim, a partir da Equação 3.5, tem-se:

$$\dot{E}_{\text{eq-diesel}} = \text{PCI}_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{eq}} = 0,12 \text{ MW}$$

logo, para as fontes energéticas avaliadas, o total de energia considerada como exergia destruída é de 1,38 MW.

Para a biomassa, o ICV feito na primeira etapa de sua rota indicou que, por cada kg de biomassa, são consumidos  $2,74 \times 10^{-2}$  kg diesel. Lembrando que o fluxo de biomassa é de 1,15 kg/s, tem-se o seguinte fluxo mássico do diesel:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = I_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{biomassa}} = 3,15 \times 10^{-2} \frac{\text{kg biomassa}}{\text{s}}$$

e, mediante a Equação 3.5, obtém-se:

$$\dot{E}_{\text{eq-diesel}} = \text{PCI}_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{eq}} = 0,4 \text{ MW}$$

### *Segunda etapa: transporte*

Para o caso do carvão, o valor da exergia consumida é calculado da mesma forma que para o cenário A. Deste modo:

$$0,57 \frac{1}{\text{t}_{\text{CE}}} \times 2 \text{ vezes (considerando ida e volta)} = 1,14 \frac{1}{\text{t}_{\text{CE}}}$$

$$\therefore 1,14 \frac{1}{\text{t}_{\text{CE}}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ t}}{1.000 \text{ kg}} \right] = 1,14 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{kg}_{\text{CE}}}$$

Lembrando que, para o cenário B, o consumo de carvão é de 7,6 kg/s e que  $\rho_{\text{diesel}} = 850 \text{ kg/m}^3$ , obtém-se o seguinte valor do fluxo de massa do combustível:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = 1,14 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{kg}} \cdot 7,6 \frac{\text{kg}_{\text{CE}}}{\text{s}} = 8,66 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot \left[ \frac{1 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1} \cdot 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 7,36 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

portanto, o valor exergético associado ao portador energético diesel durante a etapa de transporte é da ordem:

$$\dot{E}_{\text{eq-diesel}} = \text{PCI}_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{eq}} = 9,3 \times 10^{-2} \text{ MW}$$

Para o caso da biomassa, de acordo com o Apêndice B o consumo específico de combustível do caminhão é de 205 g/kWh, com potência máxima de 130 kW. Por tratar-se de um serviço leve (transportando em média 6,4 t), considera-se que o caminhão trabalha a uma potência média de 80 kW, o que equivale a um consumo da ordem de 16,4 kg/h. Para garantir a quantidade de biomassa, são necessários dois caminhões, o que gera um consumo de diesel da ordem de 32,8 kg/h. Assim, o fluxo mássico associado ao transporte é:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = 32,8 \frac{\text{kg}_{\text{diesel}}}{\text{h}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ s}} \right] = 9,11 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

e o equivalente exergético é obtido com a Equação 3.5:

$$\dot{E}_{\text{eq-diesel}} = \text{PCI}_{\text{diesel}} \cdot \dot{m}_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{eq}} = 0,11 \text{ MW}$$

### *Terceira etapa: processamento (pré-combustão)*

Tanto para o manuseio do carvão quanto para o da biomassa, a principal fonte energética identificada na etapa de processamento (pré-combustão) é a eletricidade. Somando os indicadores obtidos no ICV, conclui-se que é necessário 0,08 MW por cada MWh gerado (8% do total da energia gerada). Assim, é proposto um valor de 3,67 MW.

Os resultados apresentam um comportamento similar ao do cenário A. O ciclo térmico continua sendo o maior destruidor de exergia, respondendo a 95,4% do total, como pode ser visto a partir da Figura 4.22. Nota-se uma pequena redução em relação ao processo de mineração, o que ocorre devido a menor participação desta fonte durante a operação em combustão combinada. As demais etapas apresentam valores referentes à exergia destruída, indicadas abaixo.

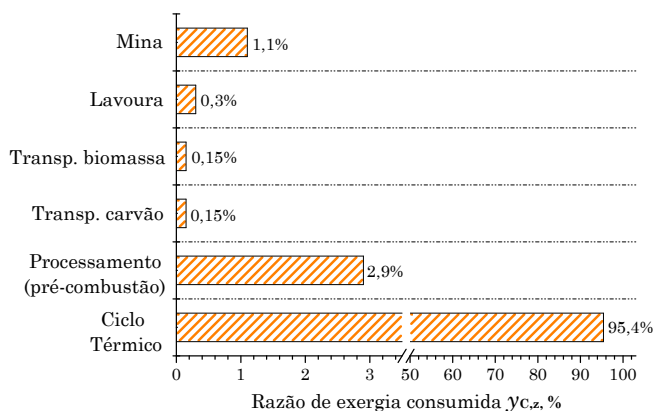


Figura 4.22 – Razão de exergia consumida no cenário B.

## 4.3 Passo 3: Análise dos resultados

Conforme exposto no Capítulo 3, a análise dos resultados visa à identificação das etapas consideradas relevantes com base nos resultados obtidos na análise exergética e ambiental. A seguir, é apresentada a avaliação dos cenários estudados, o cenário A que considera a queima



atual do carvão e o cenário B que corresponde à operação em combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa.

### 4.3.1 Avaliação exergetica e ambiental do cenário A

#### 4.3.1.1 Análise exergetica

O ciclo térmico é responsável pela destruição de 116,9 MW de exergia, o que é esperado, considerando que o processo de combustão (alto gerador de entropia), acontece no gerador de vapor. A exergia destruída nas etapas de processamento (pré-combustão), transporte e mineração é relativamente baixa somando 5,3 MW.

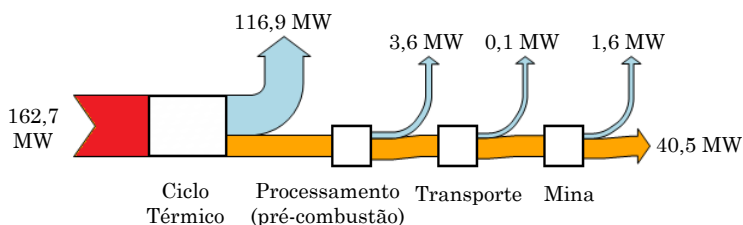


Figura 4.23 – Diagrama de Sankey relativo aos fluxos de exergia do cenário A.

A Figura 4.23 mostra o diagrama de Sankey dos fluxos de exergia em relação às etapas definidas pela fronteira. Cabe lembrar que, conforme indicado na proposta metodológica, para o caso aqui analisado, o ponto definido para início do processo é a entrada na usina termoeletrica e, por essa razão, o diagrama de Sankey apresenta uma direção contrária à rota do carvão. Na Figura 4.23, o valor de 162,7 MW corresponde à exergia associada ao carvão, 116,9 MW é o valor estimado para a exergia destruída no ciclo térmico e 3,6 MW corresponde à exergia destruída que foi estimada para a etapa de processamento (pré-combustão). Já a exergia destruída associada às etapas de transporte e mineração é pouco significativa, sendo de 0,1 e 1,6 MW, respectivamente.

Com base nos fluxos de exergia apresentados no diagrama de Sankey, foi estimada uma eficiência global para o cenário A de 24,9%.

#### 4.3.1.2 Análise ambiental

A Figura 4.24 mostra um total de 1.230 kg de CO<sub>2-eq</sub> correspondente ao impacto ambiental específico com base na unidade funcional total ( $b_{total}^{uf}$ ), para as etapas identificadas na fronteira do problema.

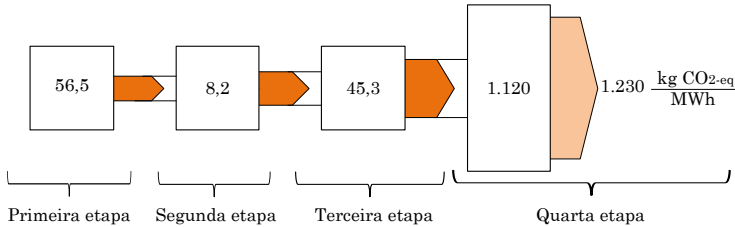


Figura 4.24 – Fluxograma de impacto ambiental específico com base na unidade funcional das etapas do cenário A.

Os fluxos mássicos dos GEE associados ao impacto direto e indireto foram calculados através das Equações 3.6 e 3.7, conforme definido na Seção 3.2.3. O impacto ambiental específico indireto com base na unidade funcional ( $b_{ind}^{uf}$ ), associada aos processos presentes a montante da usina termoeleétrica (etapas de processamento pré-combustão, transporte e mina), é de 110 kg CO<sub>2-eq</sub> por MWh. Isto indica que, para a categoria de impacto avaliada, o fluxo de carvão energético entrando na fornalha do gerador de vapor apresenta uma carga ambiental como resultado dos processos envolvidos nas etapas já mencionadas. O fluxo mássico dos gases de efeito estufa pode ser calculado a partir da Equação 3.6 de modo que:

$$\dot{B}_{GEE}^{ind} = 110 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times 45,8 \text{ MWe} = 1,4 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

Considerando que, neste trabalho, o inventário de ciclo de vida relacionado à usina termoeleétrica foi elaborado com base em uma unidade funcional de 1 MWh, o valor do impacto ambiental específico ( $b_{ind}^{uf}$ ) é expressado em  $\left[ \frac{\text{CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \right]$  e, por isso, a relação anterior contém a fração que corrige MWh para MJ, já que a potência elétrica está expressa em MW.

Igualmente, a ACV mostrou que o impacto ambiental específico associado ao impacto direto ( $b_{dir}^{uf}$ ) é de 1.120 kg CO<sub>2-eq</sub> por MWh. Se-

guindo o procedimento similar, agora, mediante aplicação da Equação 3.7, obtém-se o fluxo mássico associado aos gases de efeito estufa, na ordem de:

$$\dot{B}_{GEE}^{\text{dir}} = 14,25 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

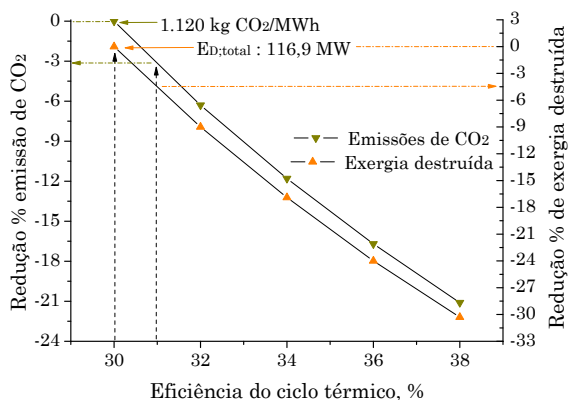
Assim, considerando-se as Equações 3.6 e 3.7, obtém-se o valor da emissão total.

$$\dot{B}_{GEE}^{\text{total}} = 15,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

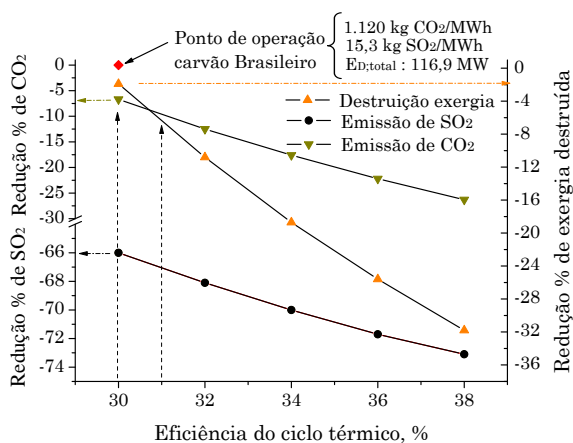
A etapa correspondente ao ciclo térmico (etapa 4) responde pela maior parte dos GEE gerados durante o processo.

A Figura 4.25 mostra os resultados da análise de sensibilidade, sendo que o parâmetro indicado para a análise é a eficiência da primeira lei estimada para a usina ( $\eta_I$ ), pelo fato de estar diretamente relacionada ao consumo do combustível e, portanto, à exergia destruída e ao  $\text{CO}_2$  liberado. Pelas características do processo, o  $\text{CO}_2$  é o GEE dominante na categoria de impacto aqui analisada. A redução percentual da emissão de  $\text{CO}_2$  e da exergia destruída em função da eficiência do ciclo termodinâmico é apresentada na Figura 4.25a. A partir do comportamento aproximadamente linear, é possível perceber que, com uma melhora de 1% na eficiência do ciclo térmico, a exergia destruída diminui em 4,5%, o que é bastante representativo, numa perspectiva econômica. O  $\text{CO}_2$  gerado diminui cerca de 3% (aproximadamente 35  $\text{CO}_2$  por MWh). O zero corresponde aos resultados apresentados (eficiência de 30%).

A Figura 4.25b indica uma redução nas emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$  na usina termoeletrica, assim como uma redução percentual da exergia destruída na usina, se for considerado que o carvão energético é substituído pelo carvão com baixo teor de enxofre da Colômbia, conforme apontado por Toftegaard *et al.* (2010). Considerando a eficiência de 30% da usina, a substituição do carvão mostra uma redução percentual de 66% para o caso do  $\text{SO}_2$ , considerado um gás de curto impacto associado a chuvas ácidas. Já a emissão do  $\text{CO}_2$  é reduzida em 7,5%. Como no caso anterior, se a eficiência da usina cresce em 1%, a emissão do  $\text{CO}_2$  pode diminuir em torno de 3%. Já o  $\text{SO}_2$  apresenta uma redução mais moderada.



(a) Influência da eficiência da usina na emissão de CO<sub>2</sub> e a exergia destruída: carvão energético.



(b) Influência da eficiência da usina nas emissões de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e a exergia destruída: carvão da Colômbia.

Figura 4.25 – Análise de sensibilidade correspondente ao ciclo térmico da usina no cenário A.

### 4.3.2 Avaliação exergética e ambiental do cenário B

Os resultados apresentados nas análises exergética e ambiental correspondem ao caso em que a biomassa responde, com base energética, por 10% do processo.

#### 4.3.2.1 Análise exergética

A análise do cenário B apresentou um comportamento similar ao já analisado no cenário A. Lembrando que o modelo termodinâmico considera uma perda na eficiência do gerador de vapor pela presença da biomassa, o valor estimado para a exergia é de 165,4 MW, sendo que a biomassa fornece 18,1 MW, conforme indicado no Apêndice C. A etapa correspondente ao ciclo térmico da usina termoeletrica continuou sendo a que apresenta maior destruição de exergia, observando que, neste cenário, a mesma é responsável pela destruição de 119,6 MW.

A Figura 4.26 mostra o diagrama de Sankey dos fluxos de exergia. A exergia destruída relacionada aos processos da rota do carvão soma 4,7 MW, enquanto a rota da biomassa corresponde a 1,01 MW, aproximadamente.

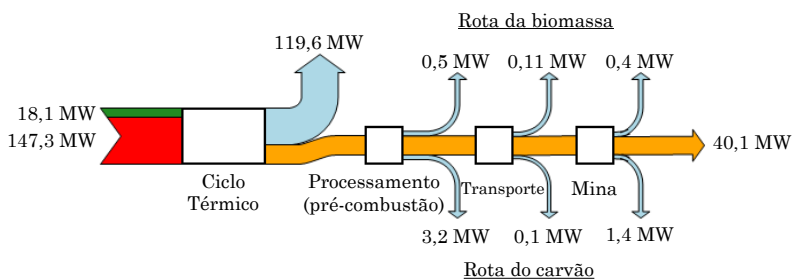


Figura 4.26 – Diagrama de Sankey relativo aos fluxos de exergia do cenário B.

Nota-se que, para a mesma energia gerada, a proposta de geração do cenário B se mostra menos eficiente que a condição de operação do cenário A. A eficiência global calculada a partir do diagrama de Sankey é de 24,2%.

### 4.3.2.2 Análise ambiental

Conforme pode ser visualizado na Figura 4.27, o impacto ambiental total com base na unidade funcional é de 1.253 kg de CO<sub>2-eq</sub> por MWh. Observa-se que há um aumento no total de GEE em relação ao cenário A, o que pode ser explicado pela maior quantidade de combustível entrando no processo de combustão.

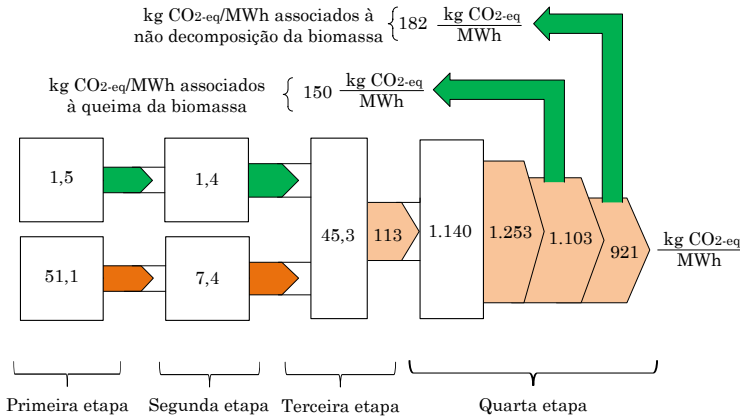


Figura 4.27 – Fluxograma de impacto ambiental específico com base na unidade funcional das etapas do cenário B.

Do mesmo modo que para o cenário A, o cálculo do fluxo mássico dos GEE devido ao impacto ambiental indireto ( $\dot{B}_{GEE}^{ind}$ ) é calculado por meio da Equação 3.6 e do valor do impacto ambiental específico indireto com base na unidade funcional ( $b_{ind}^{uf}$ ), obtido da análise de ciclo de vida. Para o caso do cenário B, o valor do ( $b_{ind}^{uf}$ ) é 113 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh. Assim:

$$\dot{B}_{GEE}^{ind} = 113 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times 45,8 \text{ MWe} = 1,44 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

A ACV mostrou que o impacto ambiental específico direto com base na unidade funcional ( $b_{dir}^{uf}$ ), relacionado ao ciclo térmico, é de 1.140 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh. O fluxo mássico do GEE, devido a este impacto, é calculado pela Equação 3.7:

$$\dot{B}_{GEE}^{dir} = 14,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

Assim, o fluxo mássico total de GEE calculado para o cenário B é de:

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = 15,9 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

É importante observar que o valor obtido supera o valor do fluxo mássico dos GEE identificados no cenário A, o que aparentemente não oferece nenhum benefício do ponto de vista ambiental. Na Figura 4.27 foi visto que dois fluxos retornam à primeira etapa da rota da biomassa. O impacto ambiental específico de  $150 \text{ kg CO}_2\text{-eq/MWh}$  corresponde ao impacto direto ( $b_{dir}^{uf}$ ) gerado durante a queima da biomassa. Já o impacto ambiental específico de  $182 \text{ kg CO}_2\text{-eq/MWh}$  corresponde ao impacto evitado pela não degradação microbiana da biomassa ao ser utilizada como combustível alternativo.

O impacto ambiental específico total com base na unidade funcional ( $b_{total}^{uf}$ ) do sistema operando no cenário B é de  $921 \text{ kg CO}_2\text{-eq/MWh}$ , o que equivale a um fluxo mássico total correspondente a:

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = 11,8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

Comparando esse resultado com o valor obtido no cenário A, que foi de  $15,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$ , pode-se afirmar que, com a operação em combustão combinada 90% carvão - 10% de biomassa em base energética, o processo gerador reduz as emissões de GEE em 31%. Cabe ressaltar que o valor identificado para a emissão evitada pela não decomposição microbiana da biomassa no campo tem um peso importante e que o valor aqui obtido, ( $182 \text{ kg CO}_2\text{-eq/MWh}$ ), responde aos critérios adotados durante o inventário de ciclo de vida do cenário B (cf. seção 4.2.2).

Finalmente, considerando o comportamento quase linear obtido na análise de sensibilidade realizada para o cenário A, é possível estender a análise para obter resultados em função da eficiência da usina.

## 4.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo, foram seguidos os três primeiros passos da proposta metodológica apresentada no Capítulo 3. A primeira parte consistiu no reconhecimento do problema, o que permitiu definir a fronteira de trabalho e reconhecer os fluxos de massa e energia considerados vitais. A segunda parte do capítulo apresentou a análise exergética e ambiental geral, considerando os dois cenários avaliados: operação atual da usina queimando somente carvão e operação em combustão combinada carvão - biomassa com participação de até 10% em base energética. Finalmente, com base nos inventários de ciclo de vida, foi possível identificar o valor do impacto ambiental específico com base na unidade funcional total ( $b_{total}^{uf}$ ) e, com isso, o fluxo mássico do GEE equivalente.

Considerando os resultados da análise geral, o Capítulo 5 apresenta a análise local da usina termoeletrica abordando os dois cenários já especificados.



## 5 *Análise local da usina termoeétrica*

Neste capítulo, é realizada a análise local da usina termoeétrica, correspondente aos passos 4 e 5 da proposta metodológica, apresentada no Capítulo 3, e aos resultados obtidos no Capítulo 4. Do mesmo modo que no Capítulo 4, a análise aborda dois cenários de interesse: cenário A, correspondente à operação atual (100% carvão) e cenário B que considera a operação da usina em combustão combinada (90% carvão - 10% biomassa).

### 5.1 Passo 4: Análise exergoambiental

A análise exergoambiental aqui apresentada baseia-se na proposta apresentada por Meyer *et al.* (2009) e consiste em três partes: análise exergética, análise ambiental mediante o método ACV e identificação de variáveis exergoambientais nos componentes do ciclo.

#### 5.1.1 Análise exergética

O objetivo da análise exergética foi identificar, com base na segunda lei da termodinâmica, os parâmetros de desempenho da usina e dos componentes do sistema que apresentam baixa eficiência ou alto potencial de melhora. Conforme visto no Capítulo 4, a análise geral do problema exigiu a elaboração de um modelo termodinâmico da usina, conforme apresentado no Apêndice C, que inclui as condições operacionais da usina e os resultados obtidos para os dois cenários em questão. Por este motivo, a análise exergética aqui apresentada não enfatiza a

descrição do ciclo termodinâmico, mas concentra-se apenas nos resultados.

A fronteira considerada para a análise local envolve todos os equipamentos envolvidos no ciclo termodinâmico, como indicado na Figura 5.1. A análise exergetica foi realizada com base nas Equações 3.12 a 3.19, apresentadas no Capítulo 3. Os parâmetros de operação considerados para a modelagem termodinâmica podem ser vistos no Apêndice C, a partir da Tabela C.1.

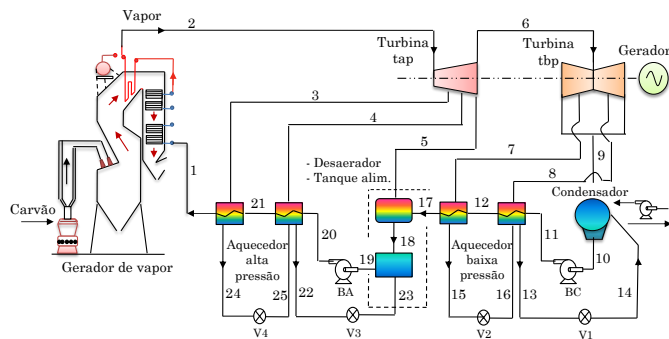


Figura 5.1 – Ciclo térmico simplificado da usina termoeletrica.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos fluxos de massa, da exergia química dos combustíveis e dos parâmetros de desempenho do ciclo termodinâmico, obtidos com o modelo de análise exergetica, que considerou os cenários A e B.

Nota-se que a exergia total do combustível entrando no processo é maior no cenário B do que no cenário A. Pode-se perceber também que o total de exergia destruída aumenta mais rapidamente no cenário B, originando uma queda nos valores calculados para a eficiência de primeira e segunda lei. O comportamento anterior pode ser explicado pelo fato de que o modelo termodinâmico considerou uma perda na eficiência do gerador de vapor associada à presença da biomassa no processo, como foi explicado na Seção 4.2.2.1.

A Figura 5.2 apresenta o diagrama de Sankey da exergia transportada pelos fluxos materiais no ciclo térmico, para cenário A. Observa-se o expressivo valor associado ao fluxo saindo do gerador de vapor correspondente à exergia destruída.

Tabela 5.1 – Parâmetros de desempenho (cenários A e B).

Parâmetro		Cenário A	Cenário B
		[100% carvão]	[carvão 90%] [biomassa 10%]
$\dot{m}_{\text{comb}}$ $[\frac{\text{kg}}{\text{s}}]$	$\dot{m}_{\text{carvão}}$	8,40	7,60
	$\dot{m}_{\text{biomassa}}$	0	1,15
	$\dot{m}_{\text{total}}$	8,4	8,75
$\dot{E}_{\text{comb}}^{\text{CH}}$ [MW]	$\dot{E}_{\text{carvão}}$	162,7	147,3
	$\dot{E}_{\text{biomassa}}$	0	18,1
	$\dot{E}_{\text{total}}$	162,7	165,4
$\eta_{\text{I}}$	[%]	30,0	29,8
$\eta_{\text{II}}$	[%]	28,15	27,7
$E_{\text{D total}}$	[MW]	116,9	119,6

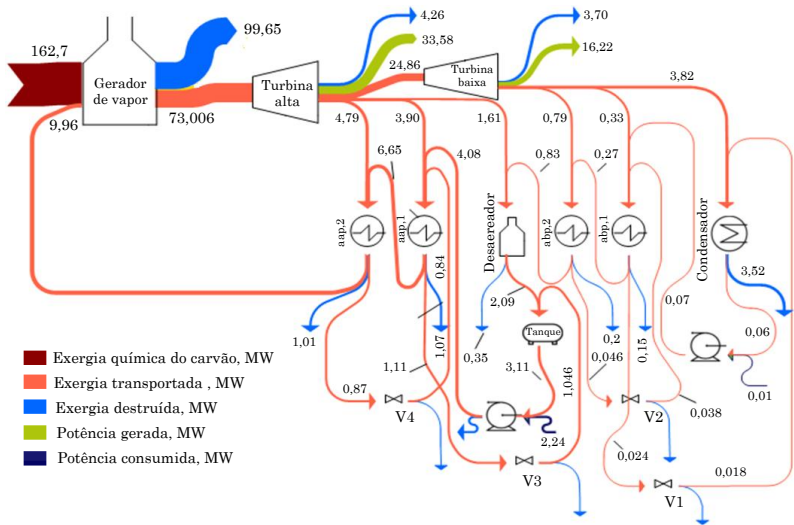


Figura 5.2 – Diagrama de Sankey dos fluxos de exergia (cenário A).

A Tabela 5.2 mostra o sistema de equações definido para o cálculo dos fluxos de exergia considerados como fonte e produto dos componentes do ciclo térmico e os parâmetros de desempenho de cada um desses componentes.

Tabela 5.2 – Exergia destruída e eficiência exergética dos equipamentos do ciclo termodinâmico.

Equipamento	Exergia fonte $\dot{E}_f$	Exergia produto $\dot{E}_p$	$\dot{E}_{f,n}$ [MW]	$\dot{E}_{p,n}$ [MW]	$\dot{E}_{D,n}$ [MW]	$y_n$ [%]	$\eta_{II}$ [%]
Gerador de vapor	$\dot{E}_{fuel}^{ch}$	$(\dot{E}_2^{ph} - \dot{E}_1^{ph})$	162,7	63,45	99,25	84,9	39,0
Turbina alta pressão	$\dot{E}_2^{ph} - (\dot{E}_3^{ph} + \dot{E}_4^{ph} + \dot{E}_5^{ph} + \dot{E}_6^{ph})$	$\dot{W}_{AP,turbina}$	37,84	33,58	4,26	3,64	88,7
Turbina baixa pressão	$\dot{E}_6^{ph} - (\dot{E}_7^{ph} + \dot{E}_8^{ph} + \dot{E}_9^{ph})$	$\dot{W}_{BP,turbina}$	19,92	16,22	3,70	3,17	81,4
Condensador <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-	-
Aquecedor BP 1	$(\dot{E}_8^{ph} + \dot{E}_{16}^{ph} - \dot{E}_{13}^{ph})$	$(\dot{E}_{12}^{ph} - \dot{E}_{11}^{ph})$	0,35	0,2	0,15	0,13	57,1
Aquecedor BP 2	$(\dot{E}_7^{ph} - \dot{E}_{15}^{ph})$	$(\dot{E}_{17}^{ph} - \dot{E}_{12}^{ph})$	0,75	0,55	0,2	0,17	73,3
Aquecedor AP 1	$(\dot{E}_4^{ph} + \dot{E}_{25}^{ph} - \dot{E}_{22}^{ph})$	$(\dot{E}_{21}^{ph} - \dot{E}_{20}^{ph})$	3,63	2,56	1,07	0,92	70,5
Aquecedor AP 2	$(\dot{E}_3^{ph} - \dot{E}_{24}^{ph})$	$(\dot{E}_1^{ph} - \dot{E}_{21}^{ph})$	3,92	2,91	1,01	0,86	74,2
Tanque alimentação	$(\dot{e}_{23}^{ph} - \dot{e}_{19}^{ph})\dot{m}_{23}$	$(\dot{e}_{19}^{ph} - \dot{e}_{18}^{ph})\dot{m}_{18}$	0,49	0,46	0,03	0,03	93,9
Desaerador	$(\dot{e}_5^{ph} - \dot{e}_{18}^{ph})\dot{m}_5$	$(\dot{e}_{18}^{ph} - \dot{e}_{17}^{ph})\dot{m}_{17}$	1,49	1,14	0,35	0,30	76,5

<sup>a</sup>Componente não considerado por ser dissipador.

Conforme mostra a Tabela 5.2, o gerador de vapor responde pela maior destruição de exergia, na ordem de 99,25 MW, seguido pelas turbinas, que respondem por 7,96 MW, e pelo condensador, por 3,52 MW. Os demais componentes apresentam valores baixos de exergia destruída.

Para o cenário B, a análise exergética apresenta um comportamento similar, diferenciando-se apenas pela maior quantidade de exergia química entrando com o combustível e pela maior quantidade de exergia destruída no gerador de vapor. Os parâmetros de operação para os demais componentes do sistema não apresentam mudanças significativas e, por essa razão, não é apresentado o diagrama de Sankey dos fluxos de exergia deste cenário.

### 5.1.2 Análise ambiental

O impacto ambiental específico total com base na unidade funcional ( $b_{total}^{uf}$ ) foi quantificado na análise geral do problema, apresentada no Capítulo 4. A Figura 5.3 mostra que o impacto total é constituído pelo impacto ambiental específico indireto ( $b_{ind}^{uf}$ ) atribuído aos processos nas etapas referentes à montante da usina termoeletrônica e pelo impacto ambiental específico direto ( $b_{dir}^{uf}$ ), ocasionado pelo processo de combustão no gerador de vapor.

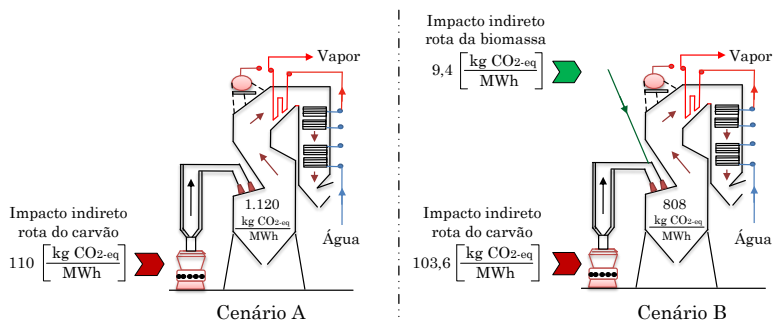


Figura 5.3 – Impacto ambiental específico direto e indireto relacionado aos cenários A e B.

Para a condição de operação atual, com 100% carvão (cenário A), o impacto ambiental específico total é de 1.230 kg CO<sub>2</sub>-eq/MWh, dos

quais 1.120 kg CO<sub>2-eq</sub> correspondem ao impacto direto associado à combustão do carvão. No caso do cenário B, o impacto ambiental total é de 921 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh, dos quais 808 kg CO<sub>2-eq</sub> correspondem à emissão referente à parcela de carvão entrando na fornalha do gerador de vapor.

O impacto ambiental ( $\dot{Y}_n$ ) do  $n$ -ésimo componente do ciclo térmico é calculado mediante a Equação 3.20 e seguindo o método ACV. É importante lembrar que ( $\dot{Y}_n$ ) considera os impactos gerados nos períodos de construção, manutenção e descarte. Tendo em vista a dificuldade para obter todas essas informações, neste estudo foi considerado apenas o impacto referente ao período de construção. Para identificar o valor do impacto associado ao período de construção de cada componente, seria necessário obter valores exatos de quantidade e de qualidade dos materiais e dos processos de manufatura envolvidos na fabricação dos mesmos. Considerando que a usina analisada é antiga, não foi possível obter essas informações, mas foram considerados valores aproximados, que permitissem concluir a análise. Para o caso do gerador de vapor, de acordo com procedimento sugerido por Boyano *et al.* (2011), foi estimado um valor correspondente a 0,001542 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

O gerador de vapor é predominantemente constituído por aço. De acordo com dados do *Ecoinvent*, esse tipo de aço apresenta um impacto ambiental específico com base na unidade funcional de 1,48 kg CO<sub>2-eq</sub> por kg de aço (quantidade que envolve certo número de processos para a obtenção de 1 kg de material). Assim, ao considerar que o gerador de vapor tem um peso de 600 toneladas, pode-se dizer que o total de kg CO<sub>2-eq</sub> é dado por:

$$m_{\text{CO}_2\text{-eq}} = 1,48 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{kg aco}} \cdot 600.000 \text{ kg aco} = 888.000 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

Para um tempo de serviço de 20 anos:

$t = 20 \text{ anos} \times \left[ \frac{8.000 \text{ h}}{\text{ano}} \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{\text{h}} \right] = 576.000.000 \text{ s}$ , o impacto ambiental total para o gerador de vapor é dado por:

$$\dot{Y}_{\text{gv}} = \frac{888.000 \text{ kg CO}_2\text{-eq}}{576.000.000 \text{ s}} = 0,001542 \text{ kg CO}_2\text{-eq/s}$$

É importante enfatizar que o valor estimado é pequeno, se comparado com os valores equivalentes aos fluxos ambientais diretos e indiretos, calculados no Capítulo 4, que foram de 15,6 kg CO<sub>2-eq</sub>/s, para o cenário A, e de 11,8 kg CO<sub>2-eq</sub>/s, para o cenário B.

Seguindo um procedimento similar, foram estimados os seguintes valores de impacto para os demais componentes do ciclo termodinâmico:

$$\dot{Y}_{\text{tap}} = 0,0008 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{tbp}} = 0,0008 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{cond}} = 0,0004 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{abp},1} = 0,0003 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{abp},2} = 0,0003 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{aap},1} = 0,0003 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{aap},2} = 0,0003 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{bc}} = 0,00001 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{ba}} = 0,00001 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{des}} = 0,0001 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

$$\dot{Y}_{\text{tanque}} = 0,0001 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$

Uma vez identificado o impacto ambiental ligado a cada componente do sistema, assim como os impactos diretos e indiretos associados ao processo, foi possível realizar o balanço dos impactos com o objetivo de identificar as variáveis exergoambientais.

### 5.1.3 Balanço exergoambiental

O balanço exergoambiental foi realizado para cada componente do ciclo térmico ilustrado na Figura 5.1, de acordo com a Equação 3.22, apresentada no Capítulo 3.

*Gerador de vapor:* Para o gerador de vapor, como indicado na Figura 5.4, o balanço exergoambiental corresponde a:

$$\dot{Y}_{\text{gv}} + \dot{B}_{\text{gv}}^{\text{fi}} = \dot{B}_2 + \dot{B}_{28} + \dot{B}_{29} - \dot{B}_1 - \dot{B}_{26} - \dot{B}_{27}$$

Como visto na seção anterior, o impacto ambiental específico alocado no carvão  $\dot{B}_{27}$  entrando na fornalha do gerador de vapor é de

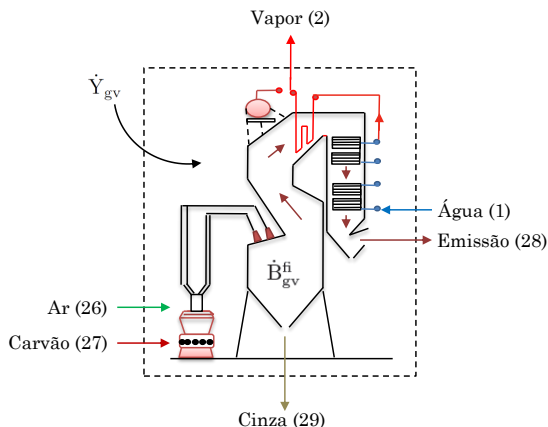


Figura 5.4 – Fluxos considerados para o balanço exergoambiental no gerador de vapor.

110 kgCO<sub>2-eq</sub>/MWh. Esse valor inclui o impacto ambiental das etapas identificadas à montante da usina.

Nesta análise, o impacto ambiental total foi atribuído completamente à energia elétrica gerada através das turbinas e, por esta razão, foi considerado que o impacto ambiental transportado pelos produtos de combustão  $\dot{B}_{28}$  e cinzas  $\dot{B}_{29}$  é zero. Já o impacto ambiental entrando com o ar  $\dot{B}_{26}$ , associado à energia elétrica consumida pelos ventiladores, está implícito no impacto do carvão, uma vez que estes consumos foram considerados na terceira etapa da fronteira, que representa parte da análise geral do problema, apresentada no capítulo anterior. O impacto ambiental do gerador de vapor  $\dot{Y}_{gv}$  foi estimado na seção anterior como 0,001542 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

O fluxo do impacto ambiental entrando com o carvão  $\dot{B}_{27}$  foi calculado a partir do impacto ambiental específico indireto, correspondente às etapas à montante da usina, e da potência elétrica gerada, conforme indicado a seguir:

$$\dot{B}_{27} = 110 \frac{\text{kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times 45,8 \text{ MWe} = 1,4 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{s}$$



É importante reiterar que, para o fluxo de impacto ambiental entrando no sistema junto ao carvão, o cálculo foi feito com base na potência elétrica gerada, e não com base na exergia química do combustível. Isso foi feito pois o impacto ambiental específico das etapas à montante foi quantificado com base na unidade funcional de 1 MWh gerado pela usina. Por essa razão, o total de impacto entrando corresponde ao impacto associado ao carvão entrando ao processo, que, para o caso aqui analisado, corresponde a uma potência gerada de 45,8 MWe.

O impacto ambiental  $\dot{B}_{\text{gv}}^{\text{fi}}$ , causado pelo processo de combustão, é dado por:

$$\dot{B}_{\text{gv}}^{\text{fi}} = b_{\text{gv}}^{\text{fi}} \dot{W}_e$$

onde:

$$b_{\text{gv}}^{\text{fi}} = 1.120 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ kJ}} \right] = 0,0003111 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kJ}$$

Já o impacto exergoambiental transportado pelos fluxos materiais entrando e saindo do gerador de vapor é calculado como mostra a Equação 3.25.

$$\dot{B}_j = \dot{E}_j b_j \Rightarrow \begin{cases} \dot{B}_1 = \dot{E}_1 b_1 \\ \dot{B}_2 = \dot{E}_2 b_2 \end{cases}$$

*Turbina de alta pressão:* o balanço exergoambiental para a turbina de alta pressão é dado por:

$$\dot{B}_{\text{w,tap}} + \dot{Y}_{\text{tap}} + \dot{B}_{\text{tap}}^{\text{fi}} = \dot{B}_3 + \dot{B}_4 + \dot{B}_5 + \dot{B}_6 - \dot{B}_2$$

onde  $\dot{B}_{\text{w,tap}}$  é o fluxo do impacto ambiental associado à parcela de energia elétrica referente à turbina de alta pressão. Considerando que o impacto ambiental específico do processo foi calculado para o cenário padrão em 1.230 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh, o impacto específico associado à turbina de alta pressão pode ser escrito como:

$$b_{\text{ele,tap}} = 1.230 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ kJ}} \right] = 0,000342 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kJ}$$

A alocação do impacto ambiental nos diferentes fluxos materiais entrando e saindo da turbina está relacionado com a Equação 3.25, de modo que:

$$\dot{B}_j = \dot{E}_j b_j \Rightarrow \begin{cases} \dot{B}_3 = \dot{E}_3 b_3 \\ \dot{B}_4 = \dot{E}_4 b_4 \\ \dot{B}_5 = \dot{E}_5 b_5 \\ \dot{B}_6 = \dot{E}_6 b_6 \end{cases}$$

Os impactos ambientais específicos dos fluxos materiais  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$  são iguais ao impacto do fluxo material  $b_2$ , já que, segundo o princípio  $F$  (visto na Seção 3.3.1.3), são decorrentes do processo de combustão no gerador de vapor. A formação de impacto no interior do componente associado a processos reativos  $\dot{B}_{\text{tap}}^{\text{fi}}$  na turbina é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida da mesma  $\dot{Y}_{\text{tap}}$  foi estimado como 0,0008 kg CO<sub>2-eq</sub>/s, conforme apresentado na seção anterior.

Os impactos ambientais específicos dos termos fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) são calculados com base nas Equações 3.27 e 3.28, como indicado a seguir:

$$b_{p,\text{tap}} = b_{\text{ele,tap}}$$

$$b_{f,\text{tap}} = \frac{\dot{B}_3 + \dot{B}_4 + \dot{B}_5 + \dot{B}_6 - \dot{B}_2}{\dot{E}_3 + \dot{E}_4 + \dot{E}_5 + \dot{E}_6 - \dot{E}_2}$$

*Turbina de baixa pressão:* do mesmo modo que para o caso da turbina de alta pressão, o balanço exergoambiental para a turbina de baixa pressão é dado por:

$$\dot{B}_{w,\text{tbp}} + \dot{Y}_{\text{tbp}} + \dot{B}_{\text{tbp}}^{\text{fi}} = \dot{B}_7 + \dot{B}_8 + \dot{B}_9 - \dot{B}_6$$

onde,  $\dot{B}_{w,\text{tbp}}$  é o fluxo do impacto associado à parcela de energia elétrica referente à turbina de baixa pressão. Assim como para a turbina de alta pressão, o impacto ambiental específico pode ser escrito como:

$$b_{\text{ele,tbp}} = 1.230 \frac{\text{kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ kJ}} \right] = 0,000342 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{kJ}$$

A alocação do impacto ambiental nos diferentes fluxos materiais entrando e saindo da turbina é realizada mediante a Equação 3.25, dessa forma:

$$\dot{B}_j = \dot{E}_j b_j = \begin{cases} \dot{B}_7 = \dot{E}_7 b_7 \\ \dot{B}_8 = \dot{E}_8 b_8 \\ \dot{B}_9 = \dot{E}_9 b_9 \end{cases}$$

Os impactos ambientais específicos dos fluxos materiais  $b_7$ ,  $b_8$  e  $b_9$  são iguais ao impacto específico  $b_6$ . A formação de impacto no interior do componente associada a processos reativos  $\dot{B}_{\text{tbp}}^{\text{fi}}$  na turbina é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida da mesma  $\dot{Y}_{\text{tbp}}$  foi estimado como 0,0008 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

Os impactos ambientais específicos dos termos fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) são dados por:

$$b_{p,\text{tbp}} = b_{\text{ele},\text{tbp}}$$

$$b_{f,\text{tbp}} = \frac{\dot{B}_7 + \dot{B}_8 + \dot{B}_9 - \dot{B}_6}{\dot{E}_7 + \dot{E}_8 + \dot{E}_9 - \dot{E}_6}$$

*Condensador:* Apesar de ser um componente dissipativo, é necessário considerar a equação de balanço exergoambiental para tornar o sistema de equações determinado. O balanço exergoambiental para o condensador é dado por:

$$\dot{B}_{q,\text{cond}} + \dot{Y}_{\text{cond}} + \dot{B}_{\text{cond}}^{\text{fi}} + \dot{B}_{\text{dis},v1} = \dot{B}_{10} - \dot{B}_9 - \dot{B}_{14}$$

onde o fluxo do impacto ambiental associado ao fluxo de calor saindo do condensador em direção ao entorno é calculado mediante a Equação 3.23, como indicado a seguir:

$$\dot{B}_{\text{cond}} = b_{\text{água rio}} \dot{E}_{q,\text{cond}}$$

onde,

$$\dot{E}_{q,\text{cond}} = \dot{Q}_{\text{cond}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_0 + 273,15 \text{ K}}{T_{\text{cond}} + 273,15} \right) \right]$$

e

$b_{\text{água rio}} = 0$ . Esse valor é proposto para fechar o sistema de equações e para que todo o impacto ambiental fique alocado na energia elétrica gerada. O valor de  $\dot{Q}_{\text{cond}}$  é obtido mediante a análise de primeira lei da termodinâmica do ciclo.

$$\dot{B}_{14} = \dot{E}_{14} b_{14}$$

A formação de impacto interno  $\dot{B}_{\text{cond}}^{\text{fi}}$  no condensador é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{\text{cond}}$  foi estimado como 0,0004 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

Como visto no Capítulo 3, o valor de  $\dot{B}_{\text{dis},v1}$  é o impacto associado à válvula 1, que funciona como elemento dissipativo e serve ao condensador. As válvulas serão abordadas no final desta seção.

*Bomba saída do condensador:* o balanço exergoambiental para a bomba localizada na saída do condensador é dada por:

$$\dot{B}_{w,bc} + \dot{Y}_{bc} + \dot{B}_{bc}^{\text{fi}} = \dot{B}_{11} - \dot{B}_{10}$$

onde o fluxo ambiental associado aos fluxos materiais 10 e 11 equivale a:

$$\dot{B}_{10} = \dot{E}_{10} b_{10}$$

e

$$\dot{B}_{11} = \dot{E}_{11} b_{11}$$

Considerando que a bomba consome energia elétrica gerada na mesma usina, o impacto ambiental específico associado ao consumo da bomba é calculado usando a Equação 3.24:

$$\dot{B}_{w,bc} = b_{\text{ele},ba} \dot{W}_{bc}$$

onde,

$$b_{\text{ele},bc} = 1.230 \frac{\text{kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ kJ}} \right] = 0,000342 \text{ kgCO}_{2\text{-eq}}/\text{kJ}$$

e  $\dot{W}_{bc}$  é a potência elétrica consumida pela bomba de condensado e calculada mediante a análise de primeira lei da termodinâmica do ciclo.

A formação interna de impacto  $\dot{B}_{bc}^{\text{fi}}$  na bomba de condensação é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{bc}$  foi estimado como 0,00001 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

O impacto ambiental específico do termo fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) é dado por:

$$b_{p,bc} = \frac{\dot{B}_{11} - \dot{B}_{10}}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10}}$$

$$b_{f,bc} = b_{ele,bc}$$

*Aquecedor baixa pressão 1:* o balanço exergoambiental para o aquecedor de baixa pressão 1 é dado por:

$$\dot{Y}_{abp,1} + \dot{B}_{abp,1}^{fp} + \dot{B}_{dis,v2} = \dot{B}_{13} + \dot{B}_{12} - \dot{B}_{11} - \dot{B}_8 - \dot{B}_{16}$$

igualmente, os impactos ambientais associados aos fluxos materiais correspondem a:

$$\dot{B}_{12} = \dot{E}_{12} b_{12}$$

$$\dot{B}_{13} = \dot{E}_{13} b_{13}$$

$$\dot{B}_{16} = \dot{E}_{16} b_{16}$$

De acordo com o princípio  $F$ , obtém-se  $b_{13} = b_{16}$ .  $\dot{B}_{abp,1}^{fi}$  é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{abp,1}$  foi estimado como 0,0003 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

As equações abaixo mostram o impacto ambiental específico do termo fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) para o aquecedor de baixa pressão 1:

$$b_{p,abp,1} = \frac{\dot{B}_{12} - \dot{B}_{11}}{\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11}}$$

$$b_{f,abp,1} = \frac{\dot{B}_8 + \dot{B}_{16} - \dot{B}_{13}}{\dot{E}_8 + \dot{E}_{16} - \dot{E}_{13}}$$

O valor de  $\dot{B}_{dis,v2}$  equivale ao impacto associado à válvula 2, considerada um elemento dissipativo que serve ao aquecedor de baixa pressão 1.

*Aquecedor baixa pressão 2:* o balanço exergoambiental para o aquecedor de baixa pressão 2 é dado por:

$$\dot{Y}_{\text{abp},2} + \dot{B}_{\text{abp},2}^{\text{fi}} = \dot{B}_{17} + \dot{B}_{15} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_7$$

onde,

$$\dot{B}_{15} = \dot{E}_{15} b_{15}$$

$$\dot{B}_{13} = \dot{E}_{17} b_{17}$$

e do princípio  $F$ :

$$b_7 = b_{15}$$

O valor de  $\dot{B}_{\text{abp},2}^{\text{fi}}$  é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{\text{abp},2}$  foi estimado como 0,0003 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

As equações abaixo mostram o impacto ambiental específico do termo fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) para o aquecedor de baixa pressão 2:

$$b_{\text{p,abp},2} = \frac{\dot{B}_{17} - \dot{B}_{12}}{\dot{E}_{17} - \dot{E}_{12}}$$

$$b_{\text{f,abp},2} = \frac{\dot{B}_{15} - \dot{B}_7}{\dot{E}_{15} - \dot{E}_7}$$

*Desaerador*: o desaerador é considerado um elemento de mistura e o sistema de equações é proposto seguindo o método SPECO, apresentado por Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), sendo adotado o caso 3, onde a exergia de um dos fluxos materiais entrando ao componente aumenta, enquanto a exergia de outro diminui. O balanço exergoambiental correspondente é dado por:

$$\dot{Y}_{\text{des}} + \dot{B}_{\text{des}}^{\text{fi}} = \dot{B}_{\text{p,des}} - \dot{B}_{\text{f,des}}$$

Considerando o princípio  $F$ , obtém-se a seguinte equação auxiliar para o fluxo quente:

$$b_{18,5} = b_5$$

O impacto associado à fonte no processo de mistura é dado por:

$$\dot{B}_{\text{f,des}} = (e_5 - e_{18})\dot{m}_5 b_5$$

O impacto ambiental específico para o fluxo material de saída será de:

$$b_{18} = \frac{\dot{m}_{17}b_{18,17} + \dot{m}_5b_{18,5}}{\dot{m}_{17} + \dot{m}_5}$$

onde impacto associado ao produto corresponde a:

$$\dot{B}_{p,des} = (e_{18}b_{18,17} + e_{17}b_{17})\dot{m}_{17} \text{ e } \dot{B}_{18} = \dot{E}_{18} b_{18}.$$

Os valores para a exergia específica, da mesma forma que para os fluxos mássicos, foram obtidos a partir das equações de balanço de segunda lei para o ciclo térmico. A formação interna de impacto  $\dot{B}_{des}^{fi}$  é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{des}$  foi estimado como 0,0001 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

As equações abaixo mostram o impacto ambiental específico do termo fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) para o desaereador:

$$b_{p,des} = \frac{(e_{18}b_{18,17} - e_{17}b_{17})\dot{m}_{17}}{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{17}}$$

$$b_{f,des} = \frac{(e_5 - e_{18})\dot{m}_5 b_5}{\dot{E}_{18} - \dot{E}_5}$$

*Tanque de alimentação:* seguindo as mesmas considerações levantadas para o desaereador, o balanço para o tanque de alimentação corresponde a:

$$\dot{Y}_{tanque} + \dot{B}_{tanque}^{fi} + \dot{B}_{dis,v3} = \dot{B}_{p,tanque} - \dot{B}_{f,tanque}$$

Considerando o princípio  $F$ , obtém-se:

$$b_{19,23} = b_{23}$$

O impacto associado ao termo fonte dado por:

$$\dot{B}_{f,tanque} = (e_{23} - e_{19})\dot{m}_{23} b_{23}$$

O impacto ambiental do produto é:

$$\dot{B}_{p,tanque} = (e_{19}b_{19,18} + e_{18}b_{18})\dot{m}_{18}$$

sendo:

$$b_{19} = \frac{\dot{m}_{18}b_{19,18} + \dot{m}_{23}b_{19,23}}{\dot{m}_{18} + \dot{m}_{23}} \text{ e } \dot{B}_{23} = \dot{E}_{23} b_{23}$$

Os valores para a exergia específica, da mesma forma que para os fluxos mássicos, foram obtidos a partir das equações de balanço para o ciclo térmico.

O impacto associado à formação interna de poluentes  $\dot{B}_{\text{tanque}}^{\text{fp}}$  é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{\text{tanque}}$  foi estimado como 0,0001 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

As equações a seguir mostram o impacto ambiental específico do termo fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) para o desaereador:

$$b_{p,\text{tanque}} = \frac{(e_{19}b_{19,18} - e_{18}b_{18})\dot{m}_{18}}{\dot{E}_{19} - \dot{E}_{18}}$$

$$b_{f,\text{tanque}} = \frac{(e_{23} - e_{19})\dot{m}_{23} b_{23}}{\dot{E}_{19} - \dot{E}_{23}}$$

O valor de  $\dot{B}_{\text{dis},v3}$  corresponde ao impacto associado à válvula 3, que funciona como elemento dissipativo e serve ao tanque de alimentação.

*Bomba de alimentação:* a equação de balanço para a bomba de alimentação equivale a:

$$\dot{Y}_{ba} + \dot{B}_{ba}^{\text{fi}} + \dot{B}_{w,ba} = \dot{B}_{20} - \dot{B}_{19}$$

Os fluxos indicados pela equação de balanço são definidos por:

$$\dot{B}_{20} = \dot{E}_{20} b_{20}$$

$$\dot{B}_{w,ba} = b_{\text{ele},ba} \dot{W}_{ba}$$

onde,

$$b_{\text{ele},ba} = 1.230 \frac{\text{kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ kJ}} \right] = 0,000342 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{kJ}$$

e  $\dot{W}_{ba}$  é a potência elétrica consumida pela bomba de condensado e calculada mediante a análise de primeira lei da termodinâmica do ciclo.



O impacto associado à formação de impacto  $\dot{B}_{ba}^{fi}$  na bomba de condensação é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{ba}$  foi estimado como 0,00001 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

O impacto ambiental específico dos termos fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) para a bomba de alimentação é indicado a seguir:

$$b_{p,ba} = \frac{\dot{B}_{20} - \dot{B}_{19}}{\dot{E}_{20} - \dot{E}_{19}}$$

$$b_{f,ba} = b_{ele,ba}$$

*Aquecedor alta pressão 1:* seguindo o mesmo procedimento já realizado para os trocadores de calor de baixa pressão, a equação de balanço exergoambiental é dada por:

$$\dot{Y}_{aap,1} + \dot{B}_{aap,1}^{fi} + \dot{B}_{dis,v4} = \dot{B}_{21} + \dot{B}_{22} - \dot{B}_4 - \dot{B}_{20} - \dot{B}_{25}$$

Assim como no caso do aquecedor de baixa pressão 1:

$$\dot{B}_{21} = \dot{E}_{21} b_{21}$$

$$\dot{B}_{22} = \dot{E}_{22} b_{22}$$

$$\dot{B}_{25} = \dot{E}_{25} b_{25}$$

Mediante o princípio  $F$ , tem-se:  $b_{25} = b_{22}$ .

O valor de  $\dot{B}_{aap,1}^{fi}$  é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{aap,1}$  foi estimado como 0,0003 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

As equações do impacto ambiental específico dos termos fonte e produto ( $b_{i,n}$ ) são dadas a seguir:

$$b_{p,aap,1} = \frac{\dot{B}_{21} - \dot{B}_{20}}{\dot{E}_{21} - \dot{E}_{20}}$$

$$b_{f,aap,1} = \frac{\dot{B}_4 + \dot{B}_{25} - \dot{B}_{22}}{\dot{E}_4 + \dot{E}_{25} - \dot{E}_{22}}$$

O valor de  $\dot{B}_{dif,v4}$  corresponde ao impacto associado à válvula 4.

*Aquecedor alta pressão 2:* a equação de balanço exergoambiental queda:

$$\dot{Y}_{\text{aap},2} + \dot{B}_{\text{aap},2}^{\text{fi}} = \dot{B}_1 + \dot{B}_{24} - \dot{B}_{21} - \dot{B}_3$$

Igualmente,  $\dot{B}_{24} = \dot{E}_{24} b_{24}$  e  $b_3 = b_{24}$

O impacto associado à formação interna de poluentes  $\dot{B}_{\text{aap},2}^{\text{fi}}$  é zero e o impacto ambiental associado ao ciclo de vida  $\dot{Y}_{\text{aap},2}$  foi proposto como 0,0003 kg CO<sub>2-eq</sub>/s.

O impacto ambiental específico dos termos fonte e produto é indicado pelas equações abaixo:  $(b_{i,n})$ .

$$b_{\text{p,aap},2} = \frac{\dot{B}_1 - \dot{B}_{21}}{\dot{E}_1 - \dot{E}_{21}}$$

$$b_{\text{f,aap},2} = \frac{\dot{B}_3 - \dot{B}_{24}}{\dot{E}_3 - \dot{E}_{24}}$$

*Válvula:* as válvulas são tratadas como elementos dissipativos que servem a outros componentes do sistema, assim, por exemplo, a válvula 1 serve ao condensador, a válvula 2 ao aquecedor de baixa pressão 1, a válvula 3 ao tanque alimentador e a válvula 4 ao aquecedor de alta pressão 1. As equações para cada uma delas são dadas a seguir:

*Válvula 1:*

$$\Delta \dot{E}_{13.14} = \dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}$$

$$\dot{B}_{\text{dis,v1}} = \Delta \dot{E}_{13.14} b_{13}$$

Com base no princípio  $F$ , obtém-se:  $b_{14} = b_{13}$

*Válvula 2:*

$$\Delta \dot{E}_{15.16} = \dot{E}_{15} - \dot{E}_{16}$$

$$\dot{B}_{\text{dis,v2}} = \Delta \dot{E}_{15.16} b_{15}$$

Com base no princípio  $F$ , obtém-se:  $b_{15} = b_{16}$ .

*Válvula 3:*

$$\Delta \dot{E}_{22.23} = \dot{E}_{22} - \dot{E}_{23}$$

$$\dot{B}_{\text{dis},v3} = \Delta \dot{E}_{22.23} b_{22}$$

Com base no princípio  $F$ , obtém-se:  $b_{23} = b_{22}$ .

*Válvula 4:*

$$\Delta \dot{E}_{24.25} = \dot{E}_{24} - \dot{E}_{25}$$

$$\dot{B}_{\text{dis},v4} = \Delta \dot{E}_{24.25} b_{24}$$

Com base no princípio  $F$ , obtém-se:  $b_{24} = b_{25}$ .

## 5.2 Passo 5: Análise dos resultados

A seguir, são apresentados os resultados obtidos do sistema de equações definido na seção anterior e da avaliação das variáveis apresentadas no Capítulo 3, com relação aos dois cenários analisados.

### 5.2.1 Cenário A: operação atual com 100% carvão

A Figura 5.5 mostra o diagrama de Sankey correspondente ao impacto exergoambiental ( $\dot{B}_j$ ), dado em  $\left[\frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}}\right]$ , transportado pelos fluxos materiais do sistema, com relação ao cenário A.

Nota-se que o comportamento desse fluxo é decorrente do modelo proposto na seção anterior, o qual visa atribuir o impacto total gerado através das etapas do processo ao produto final, isto é, à eletricidade gerada pela usina termoeletrica. O valor do impacto exergoambiental saindo do sistema, através das turbinas de alta e baixa pressão, soma 16,43 kg CO<sub>2-eq</sub>/s. Esse valor é resultado da soma dos impactos entrando ao sistema com o fluxo de carvão, do impacto associado à eletricidade consumida pelas bombas de condensação e alimentação, do impacto devido ao ciclo de vida dos componentes do sistema e do impacto direto da combustão do carvão identificado como  $\dot{B}_{\text{gv}}^{\text{fi}}$  no modelo do gerador de vapor.

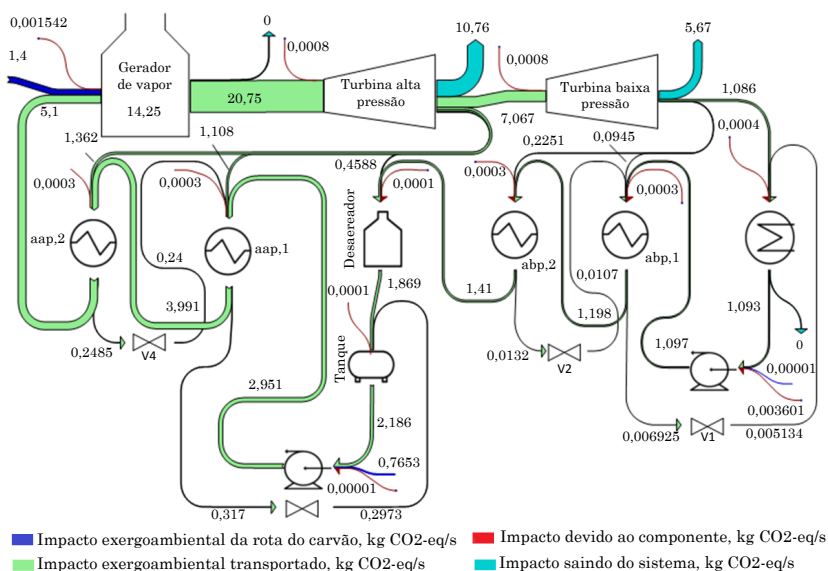


Figura 5.5 – Fluxo de impacto exergoambiental do cenário A.

O fluxo de 1,4 kg CO<sub>2</sub>-eq/s que entra no sistema através do gerador de vapor corresponde ao impacto gerado nos processos presentes nas etapas definidas para a rota do carvão a montante da usina (valor estimado na análise geral do problema realizada no Capítulo 4). O modelo indicou também que 14,25 kg CO<sub>2</sub>-eq/s correspondem ao impacto ambiental do processo de combustão<sup>1</sup>.

Pode-se observar que existe uma diferença entre o valor calculado na análise local (16,43 kg CO<sub>2</sub>-eq/s) e o valor de 15,6 kg CO<sub>2</sub>-eq/s, calculado na análise geral apresentada no Capítulo 4. Essa diferença se deve ao fato de que, durante a análise local, outros fluxos de impacto entrando no sistema foram considerados<sup>2</sup>.

A Tabela 5.3 mostra o resultado obtido na avaliação das variáveis

<sup>1</sup>Na Seção 4.3.2.1, foi estimado um impacto de 1.120 kg CO<sub>2</sub>-eq/MWh relacionado à usina termoeletrica. Para uma potência elétrica gerada de 45,8 MWe, tem-se:  $1.120 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times 45,8 \frac{\text{MJ}}{\text{s}} = 14,25 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}}$ .

<sup>2</sup>Além dos impactos diretos e indiretos, a análise local considera o impacto atribuído ao ciclo de vida dos componentes da usina e o impacto associado à eletricidade consumida pelas bombas presentes no sistema.

exergoambientais apresentadas na proposta metodológica e definidas mediante as Equações 3.27 a 3.32. O impacto ambiental específico em base exergética ( $b_j$ ), associado aos fluxos materiais no interior do sistema, pode ser obtido a partir da Equação 3.25 e dos valores apresentados nas Figuras 5.2 e 5.5, que indicam o valor dos fluxos exergéticos e do impacto exergoambiental, respectivamente<sup>3</sup>.

Nota-se que os valores obtidos do impacto ambiental específico da fonte ( $b_{f,n}$ ) e do produto ( $b_{p,n}$ ) em base exergética, para cada componente do sistema, estão em conformidade com o que foi afirmado por Meyer *et al.* (2009), com relação à influência da posição relativa do componente dentro do sistema e de sua interconexão com outros. Dessa forma, componentes próximos à fonte exergética, que, neste caso, está relacionada ao gerador de vapor, apresentaram valores de ( $b_{f,n}$ ) e de ( $b_{p,n}$ ) baixos, e componentes distantes da fonte apresentaram valores mais altos. Os resultados indicam, portanto, que os valores mais baixos estão relacionados ao gerador de vapor, e os valores mais altos estão relacionados às turbinas e aos aquecedores intermediários de alta e baixa pressão, que têm conexão direta com as turbinas.

Como definido no Capítulo 3, o impacto ambiental associado à exergia destruída ( $\dot{B}_{D,n}$ ) representa o impacto ambiental devido à exergia destruída no componente. A Tabela 5.3 mostra que o gerador de vapor apresenta o maior impacto associado à exergia destruída, sendo seguido pelas turbinas. Nota-se também que as turbinas apresentam um valor próximo ao valor calculado para o gerador de vapor, o que é explicado pelo efeito do impacto ambiental específico do termo fonte, que, no caso do gerador de vapor, apresenta um valor baixo, se comparado com o valor calculado para as turbinas.

---

<sup>3</sup> Analisando o ponto 2 do ciclo termodinâmico representado pelas Figuras 5.1 e 5.2, pode-se observar que o fluxo de exergia é de 73,009 MW. A Figura 5.5 mostra que, para o mesmo ponto, o fluxo de impacto exergoambiental é de 20,75  $\frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}}$ . Assim, a partir da Equação 3.25, tem-se:  $b_{25} = 0,2842 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MW}}$ , cujo valor é equivalente ao impacto específico médio em base exergética.

Tabela 5.3 – Variáveis exergoambientais da usina termoeletrica. Cenário A.

Equipamento	$\dot{Y}_n^{total}$ $\left[\frac{\text{kg CO}_2-\text{eq}}{\text{s}}\right]$	$\dot{B}_n^{fi}$ $\left[\frac{\text{kg CO}_2-\text{eq}}{\text{s}}\right]$	$\dot{B}_{D,n}$ $\left[\frac{\text{kg CO}_2-\text{eq}}{\text{s}}\right]$	$b_{f,n}$ $\left[\frac{\text{kg CO}_2-\text{eq}}{\text{MJ}}\right]$	$b_{p,n}$ $\left[\frac{\text{kg CO}_2-\text{eq}}{\text{MJ}}\right]$	$r_{b,n}$	$f_{b,n}$
Gerador de vapor	0,001542	15,65 <sup>a</sup>	2,7671	0,02788	0,2466	7,8451	0,8498
Turbina alta pressão	0,0008	0	1,2107	0,2842	0,3417	0,2023	0,0007
Turbina baixa pressão	0,0008	0	1,0515	0,2842	0,3417	0,2023	0,0006
Condensador <sup>b</sup>	–	–	–	–	–	–	–
Aquecedor BP 1	0,0003	0	0,0426	0,2842	0,4973	0,7498	0,007
Aquecedor BP 2	0,0003	0	0,0568	0,2842	0,3846	0,3533	0,0053
Aquecedor AP 1	0,0003	0	0,3041	0,2842	0,4056	0,4265	0,0010
Aquecedor AP 2	0,0003	0	0,2870	0,2842	0,3828	0,3469	0,0010
Tanque alimentação <sup>c</sup>	–	–	–	–	–	–	–
Desaerador <sup>d</sup>	–	–	–	–	–	–	–

<sup>a</sup>Valor que corresponde à soma do impacto formado no gerador de vapor e do impacto associado ao carvão entrando na fornalha.

<sup>b</sup>Componente dissipativo

<sup>c</sup>Componente dissipativo

<sup>d</sup>Componente dissipativo

### 5.2.2 Cenário B: operação em combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa

A Figura 5.6 mostra o fluxo de impacto exergoambiental ( $\dot{B}_j$ ), dado em  $[\frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}}]$ , para o cenário B, com uma participação de 10% de biomassa em base energética, obtido através de um sistema de equações análogo ao proposto para a condição padrão, vista anteriormente.

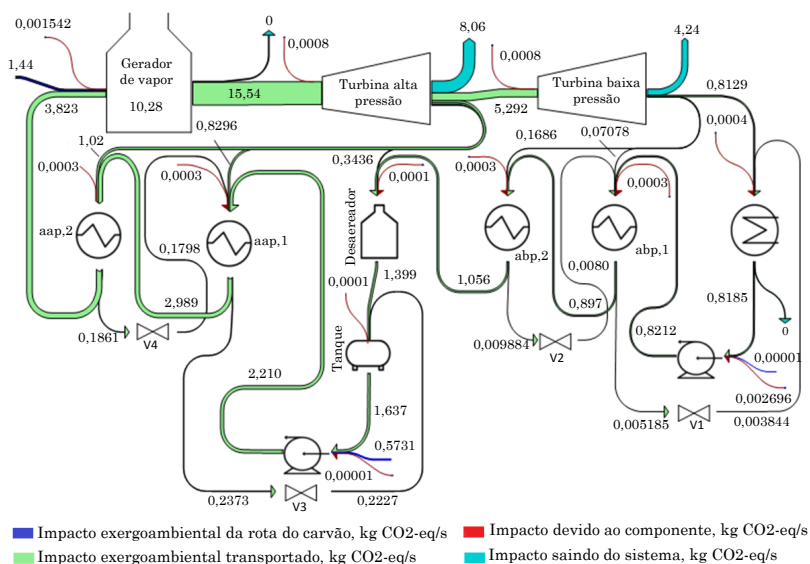


Figura 5.6 – Fluxo de impacto exergoambiental do cenário B.

Observa-se que, para a condição de operação em combustão combinada, o comportamento dos fluxos exergoambientais mantém correspondência com a condição vista no cenário A. Esse resultado era esperado, já que, para obter o valor dos fluxos exergoambientais, foi utilizado o mesmo modelo apresentado na Seção 5.1.3. Por outro lado, pode-se observar que o valor dos fluxos exergoambientais é menor do que no cenário A. Isso ocorre pois o segundo modelo considera somente o impacto gerado pela combustão da parcela do carvão<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>A Tabela E.4 do Apêndice E mostrou que, para a condição de combustão combinada com até 10% de biomassa em base energética, a parcela de carvão entrando no processo responde por  $990 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}}$ . Além disso, observa-se que, no inventário de

A soma dos impactos saindo do sistema através das turbinas de alta e baixa pressão somam 12,3 kg CO<sub>2-eq</sub>/s, ultrapassando o valor já calculado na análise geral, que foi de 11,8 kg CO<sub>2-eq</sub>/s. Como explicado no caso do cenário A, essa diferença se deve à presença de outros fluxos entrando ao sistema.

A Tabela 5.4 mostra o resultado da avaliação das variáveis exergo-ambientais para o cenário B. Nota-se que os valores obtidos são semelhantes aos encontrados na análise da seção anterior. Por essa razão, não foi realizada uma análise detalhada para cada variável.

Para o caso das variáveis impacto ambiental específico da fonte ( $b_{f,n}$ ) e do produto ( $b_{p,n}$ ) em base exergética, os valores obtidos para cada componente do sistema seguem um comportamento similar ao já analisado na seção anterior. Neste cenário, novamente os valores mais baixos estão relacionados ao gerador de vapor, onde os fluxos de exergia são os mais altos.

O impacto ambiental associado à exergia destruída mostra que, para o caso do gerador de vapor, o valor cresce em torno de 10%. Esse comportamento mostra-se coerente, considerando que o modelo exergético do cenário B afetou a eficiência energética do gerador de vapor em 0,5% por cada 10% de biomassa em base energética entrando na fornalha. (ver Seção 4.2.2.1). Como esperado, os demais componentes do sistema apresentam certa redução para essa variável.

Com base na diferença relativa do impacto ambiental ( $r_{b,n}$ ), observa-se que o gerador de vapor continua apresentando o maior potencial de redução do impacto. No entanto, é importante notar que, se comparado com o cenário A, o potencial é mais baixo, o que pode ser explicado pela penalização atribuída ao gerador de vapor no modelo durante a operação no cenário B. Os demais componentes do sistema apresentam valores análogos aos já analisados no cenário A.

---

ciclo de vida, foi estimado um valor de  $182 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}}$ , correspondente à emissão evitada devido à degradação microbiana da biomassa ao ser utilizada como combustível alternativo. Assim, torna-se evidente que o valor efetivo da emissão associada ao processo é de  $808 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}}$ . Para a condição de operação de 45,8 MWe gerados pela usina, tem-se:  $808 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times 45,8 \frac{\text{MJ}}{\text{s}} = 10,28 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}}$ .



Tabela 5.4 – Variáveis exergoambientais da usina termelétrica. Cenário B.

Equipamento	$\dot{Y}_n^{total}$ $\left[ \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}} \right]$	$\dot{B}_n^{fi}$ $\left[ \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}} \right]$	$\dot{B}_{D,n}$ $\left[ \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{s}} \right]$	$b_{f,n}$ $\left[ \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}} \right]$	$b_{p,n}$ $\left[ \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}} \right]$	$r_{b,n}$	$f_{b,n}$
Gerador de vapor	0,001542	11,72 <sup>a</sup>	2,9198	0,02864	0,1847	5,449	0,8006
Turbina alta pressão	0,0008	0	0,9065	0,2128	0,2558	0,2021	0,00088
Turbina baixa pressão	0,0008	0	0,7874	0,2128	0,2558	0,2021	0,00102
Condensador <sup>b</sup>	-	-	-	-	-	-	-
Aquecedor BP 1	0,0003	0	0,0319	0,2128	0,3727	0,7514	0,00931
Aquecedor BP 2	0,0003	0	0,0426	0,2128	0,2881	0,3539	0,00700
Aquecedor AP 1	0,0003	0	0,2277	0,2128	0,3036	0,4267	0,0130
Aquecedor AP 2	0,0003	0	0,2149	0,2128	0,2867	0,3473	0,00139
Tanque alimentação <sup>c</sup>	-	-	-	-	-	-	-
Desaerador <sup>d</sup>	-	-	-	-	-	-	-

<sup>a</sup>Valor que corresponde à soma do impacto formado no gerador de vapor e do impacto associado ao carvão entrando na fornalha

<sup>b</sup>Componente dissipativo

<sup>c</sup>Componente dissipativo

<sup>d</sup>Componente dissipativo

Apesar de apresentar uma redução em relação ao primeiro cenário, o fator exergoambiental ( $f_{b,n}$ ) indicou que, para o gerador de vapor, a formação de impacto no interior  $\dot{B}_{gv}^{fi}$  continua sendo dominante. Os demais componentes do sistema mostraram um pequeno aumento no fator, como consequência da redução no valor do impacto ambiental associado à exergia destruída.

### 5.3 Fator exergoambiental global ( $f_{GEE}^{ea}$ )

Com base nos resultados obtidos da análise exergética e ambiental, foi proposto um fator de avaliação exergoambiental global que permitiu comparar os cenários estudados (A e B) com o cenário correspondente à máquina térmica de Carnot, por tratar-se do ponto de máxima eficiência teórica tecnicamente possível. A Figura 5.7 mostra a curva característica de eficiência Carnot de uma máquina térmica que opera entre  $T_0$  e  $T$ , isto é, entre o ponto de operação para a condição padrão e o ponto máximo teórico possível, com base na segunda lei da termodinâmica, que poderia ser alcançado pela usina, considerando as condições de operação da mesma.

Durante a análise geral, foi visto que, para o caso de operação padrão, o fluxo de impacto associado à geração de 1 MWh é de 1.230 kg  $CO_{2-eq}$ , sendo que 110 kg  $CO_{2-eq}$  correspondem ao impacto indireto associado às etapas a montante da usina, e 1.120 kg  $CO_{2-eq}$  correspondem ao impacto direto devido à operação da usina termoeletrica.

A equação que define, de maneira geral, o comportamento do sistema, para o caso da condição padrão, dada a partir da Equação 3.33, é definida como:

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = m \dot{W}_{e,i} + \dot{B}_{GEE}^{ind} \Rightarrow \begin{cases} m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1.120 \frac{kg \text{ } CO_{2-eq}}{MWh} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times \dot{W}_e}{\dot{W}_e} \\ \dot{B}_{GEE}^{ind} = 110 \frac{kg \text{ } CO_{2-eq}}{MWh} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times \dot{W}_e \end{cases}$$

Substituindo os valores apresentados anteriormente na Equação 3.33, obtém-se uma expressão que quantifica o fluxo de impacto ambiental em função da potência gerada pela usina, como indicado a seguir:

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = 0,3111\dot{W}_e + 0,03055\dot{W}_e$$

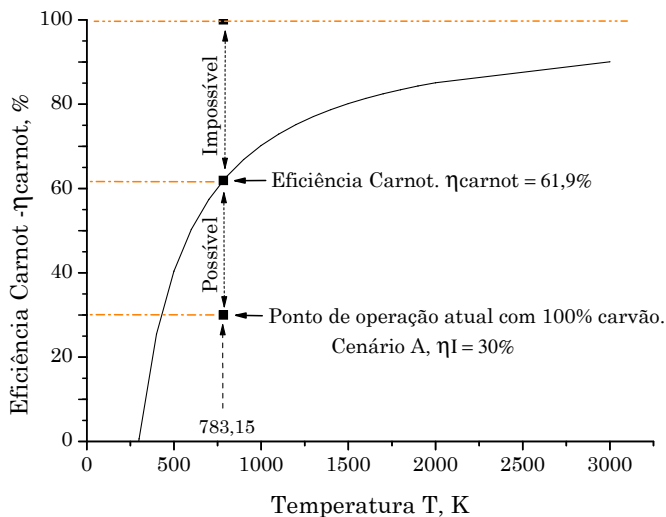


Figura 5.7 – Curva característica de eficiência Carnot para uma máquina térmica.

Substituindo os valores da potência gerada de 5 a 50 MWe, tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{W}_5 &\Rightarrow \dot{m}_{CO_2-eq} = 1,708 \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}, \text{ com } \dot{B}_{GEE}^{ind} = 0,1527 : \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s} \\ \dot{W}_{10} &\Rightarrow \dot{m}_{CO_2-eq} = 3,417 \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}, \text{ com } \dot{B}_{GEE}^{ind} = 0,3055 : \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s} \\ \dot{W}_{20} &\Rightarrow \dot{m}_{CO_2-eq} = 6,833 \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}, \text{ com } \dot{B}_{GEE}^{ind} = 0,6111 : \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s} \\ \dot{W}_{30} &\Rightarrow \dot{m}_{CO_2-eq} = 10,249 \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}, \text{ com } \dot{B}_{GEE}^{ind} = 0,9165 : \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s} \\ \dot{W}_{40} &\Rightarrow \dot{m}_{CO_2-eq} = 13,666 \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}, \text{ com } \dot{B}_{GEE}^{ind} = 1,2220 : \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s} \\ \dot{W}_{50} &\Rightarrow \dot{m}_{CO_2-eq} = 17,083 \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}, \text{ com } \dot{B}_{GEE}^{ind} = 1,528 : \frac{\text{kg } CO_2-eq}{s}\end{aligned}$$

A Figura 5.8 mostra o conjunto de curvas características do cenário A, para cada condição de geração apresentada anteriormente. Nota-se que o corte no eixo  $y$ , corresponde ao impacto associado às etapas a montante da usina e, portanto, é considerado um impacto não associado ao processo de geração na usina termoeletrica. A linha interrompida,

definida mediante a equação  $\dot{B}_{GEE}^{total} = 0,3417\dot{W}_e$ , caracteriza o comportamento do sistema nesse cenário, considerando a fronteira estendida, que tem como origem o ponto zero do sistema cartesiano.

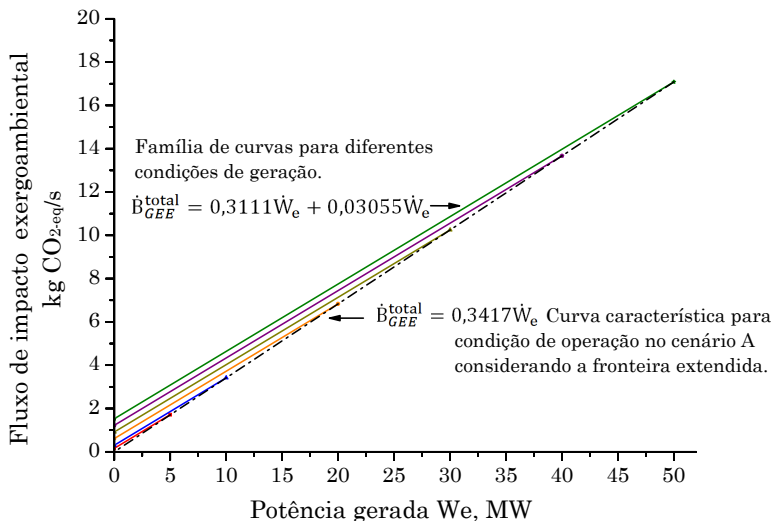


Figura 5.8 – Curva característica do sistema no cenário A.

A avaliação do cenário B foi feita com base nos resultados obtidos da análise geral realizada no Capítulo 4. Como visto na Figura 4.27, o impacto ambiental direto, devido à operação da usina no cenário B, é de 1.140 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh. No entanto, 150 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh correspondem à parcela da biomassa, que, como já discutido, é considerada emissora neutra. Dessa forma, o impacto direto devido à queima do carvão é de 990 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh.

O impacto ambiental indireto relacionado às etapas definidas a montante da usina somam 113 kg CO<sub>2-eq</sub>/MWh, assim, seguindo um procedimento similar ao realizado para o caso do cenário A, tem-se:

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = m \dot{W}_e + \dot{B}_{GEE}^{ind} \Rightarrow \begin{cases} m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{990 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times \dot{W}_e}{\dot{W}_e} \\ \dot{B}_{GEE}^{ind} = 113 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{MWh}} \cdot \left[ \frac{1 \text{ MWh}}{3.600 \text{ MJ}} \right] \times \dot{W}_e \end{cases}$$

e a equação que quantifica o fluxo de impacto ambiental em função da potência gerada pela usina neste cenário é dada por:

$$\dot{B}_{GEE}^{total} = 0,275\dot{W}_e + 0,0314\dot{W}_e$$

O modelo termodinâmico elaborado para a análise exergética apresentado no Apêndice C e o modelo de combustão dado no Apêndice D permitiram a avaliação da usina termoeletrica para a condição de eficiência máxima teórica possível (eficiência Carnot, indicada na Figura 5.7 como 61,9%).

A Figura 5.9 mostra o conjunto de curvas características do sistema para diferentes condições de operação (condição atual 100% carvão e combustão combinada com participação da biomassa de até 20% em base energética).

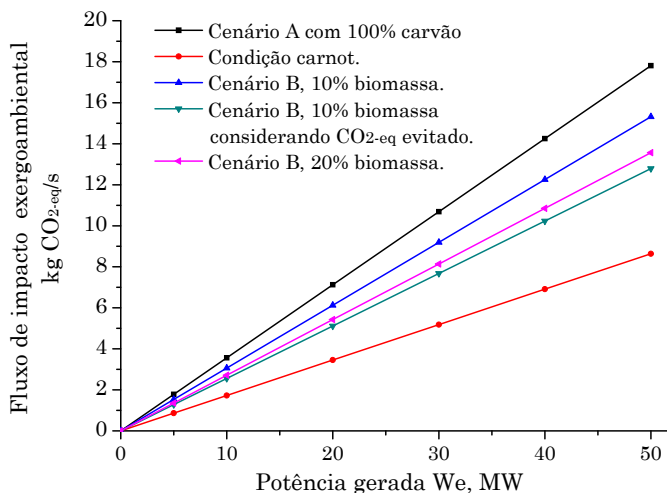


Figura 5.9 – Curva do sistema para diferentes condições de operação.

Pode-se observar que, quando há maior participação da biomassa, a curva do sistema apresenta menor inclinação, indicando menor impacto associado ao processo. Também pode-se ver que, para o caso de

uma participação de 10% de biomassa, considerando a emissão evitada devido à não decomposição microbiana da biomassa nas lavouras, o ponto de operação fica mais próxima da curva que indica a condição de operação Carnot. O caso de operação com até 20% de biomassa resulta bastante atrativo do ponto de vista ambiental. Cabe lembrar que, neste trabalho, a parcela da emissão evitada foi estimada a partir da quantidade de carbono presente na biomassa.

O fator exergoambiental global ( $f_{GEE}^{ea}$ ) pode ser calculado para cada uma das condições de operação indicadas na Figura 5.9, mediante a Equação 3.35. A Figura 5.10 mostra o valor desse fator para o cenário A (condição atual 100% carvão) e no cenário B (combustão combinada com participação da biomassa de até 30% em base energética). O indicador mostra que há melhora de 11% no cenário B, sem levar em consideração a decomposição microbiana da biomassa na lavoura, e de até 35%, identificada como combustão combinada\* se for considerada a não decomposição da biomassa, como estabelecido neste trabalho, respeito ao cenário A.

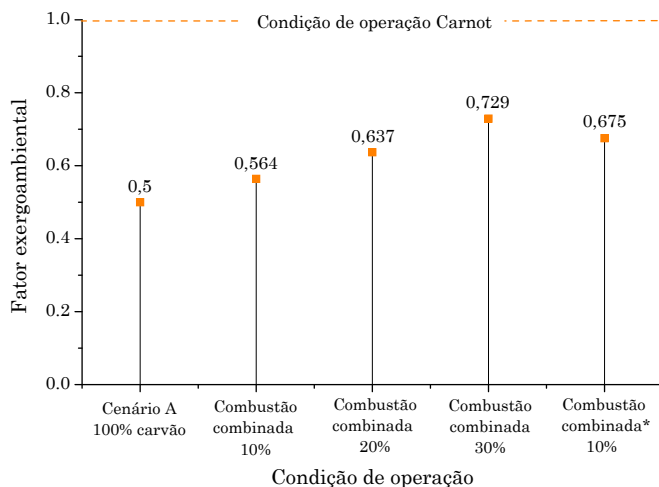


Figura 5.10 – Fator exergoambiental global para diferentes condições de operação.

Por último, é importante salientar que, apesar de esse fator apresentar uma forma simples para seu cálculo, por trata-se de um quociente, a identificação da inclinação característica do sistema requer a

participação da maioria dos passos que constituem a proposta metodológica. Isso indica que o cálculo do fator exige a participação de um número considerável de variáveis, como foi observado no desenvolvimento deste estudo.

## 5.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo, foram seguidos os dois últimos passos da proposta metodológica apresentada no Capítulo 3. A primeira parte apresentou a análise exergoambiental, seguindo a proposta apresentada por Meyer *et al.* (2009), que consistiu em três passos: análise exergética do ciclo termodinâmico, análise ambiental mediante o método de análise de ciclo de vida (ACV) e avaliação das variáveis exergoambientais, visando a identificação de equipamentos com possibilidade de melhora. Na segunda parte, foi proposto um fator exergoambiental para a análise global do sistema, considerando a fronteira estendida, que toma como parâmetro de comparação a máquina térmica de Carnot. Da mesma forma que para a análise geral, apresentada no Capítulo 4, a análise local da usina termoeletrica considerou os dois cenários avaliados nesta pesquisa: operação atual com 100% carvão, e operação em combustão combinada, com participação da biomassa de até 30% em base energética.





## 6 *Considerações finais*

Esta tese teve como objetivo geral propor uma metodologia de avaliação exegética e ambiental para plantas termoeletricas adaptadas para operar em combustão combinada de carvão pulverizado e biomassa residual, considerando uma fronteira estendida entre a usina termoeletrica e as rotas tecnológicas para a obtenção e manuseio dos combustíveis envolvidos. Considerando a natureza do processo, a categoria de impacto avaliada na análise ambiental foi mudança climática. Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização deste estudo e serão sugeridos trabalhos futuros que possam dar continuidade à essa temática, tendo em vista o melhoramento de procedimentos identificados como relevantes durante o desenvolvimento do trabalho.

### 6.1 Conclusões gerais

- A proposta metodológica apresentada mostrou ser adequada para a avaliação exergética e ambiental de uma usina termoeletrica projetada para operar com carvão mineral e adaptada para operar em combustão combinada. Os resultados finais mostraram coerência com os dados reportados na literatura. Esse resultado foi obtido estimando-se valores referentes à emissão evitada pela não decomposição da biomassa e às frações dos produtos de combustão calculadas a partir do modelo teórico.
- Para o caso de operação 100% carvão (cenário A), os resultados mostraram que, do ponto de vista exergético, a rota de obtenção e manuseio de carvão reponde por 4,4% da exergia consumida. Os resultados da análise ambiental mostraram um comportamento similar, sendo o ciclo térmico responsável por 91%

do total do impacto gerado, associado à categoria de impacto mudança climática.

- Para o caso de operação com 90% carvão e 10% de biomassa (cenário B), os resultados foram similares aos do cenário A. Nesse caso as rotas de obtenção e manuseio dos combustíveis foram responsáveis pelo consumo de 4,6% da exergia envolvida. Com relação à análise ambiental, o ciclo térmico respondeu por 90,9% do total de impacto gerado, associado à categoria de impacto mudança climática.
- Tendo em vista esses resultados, conclui-se que as análises que visam a obtenção de parâmetros de desempenho, tanto energéticos como ambientais, para um sistema de conversão de energia, devem considerar a participação das leis termodinâmicas e basear-se em uma metodologia específica de avaliação ambiental que quantifique o impacto a partir do processo em questão.
- O modelo proposto para o gerador de vapor respondeu adequadamente às condições de operação em que a biomassa participou no processo de combustão, de modo que sua eficiência diminuiu quando a biomassa participou no processo. Esse resultado esteve em conformidade com outros estudos, especialmente com os trabalhos indicados pelo *Electric Power Research Institute (EPRI)*, que tratam da análise de geradores de vapor operando em combustão combinada carvão - biomassa residual.
- O método de análise de ciclo de vida (ACV) mostrou ser adequado para quantificar o impacto ligado a um processo ou produto. No entanto, observou-se que o resultado obtido depende, em grande medida, do modo como foi abordado o problema, com relação aos critérios de corte, à definição da fronteira e à identificação de fluxos de massa e energia, considerados relevantes para a categoria de impacto avaliada.
- O modelo de combustão proposto para a obtenção das espécies químicas nos produtos da combustão, para ambos os cenários, apresentou comportamento adequado para a categoria de impacto aqui analisada e esteve em conformidade com os resultados apresentados na literatura. A fração molar identificada para o CO<sub>2</sub> é dominante na categoria de impacto denominada mudança climática, sendo esse o principal gás de efeito estufa emitido durante o processo.

- O inventário de ciclo de vida (ICV) correspondeu à fase com maior relevância para a avaliação do ciclo de vida. Conclui-se que os dados usados para o inventário devem ser controlados a partir de históricos mensais do fluxo de interesse, pois a observação do fluxo por um determinado período de tempo possibilita maior grau de confiabilidade nos resultados obtidos.
- A análise geral do problema mostrou resultados coerentes com a ordem de grandeza das quantidades reportadas na literatura relacionada. O modelo de avaliação ambiental permitiu quantificar o impacto associado à categoria mudança climática em cada uma das etapas definidas pela fronteira. O modelo exergético quantificou a exergia consumida. Em ambos os cenários, a etapa correspondente à usina termoeletrica apresentou os valores mais representativos, o que foi relacionado ao fato de o processo de combustão ocorrer na usina.
- A análise local da usina baseou-se em uma proposta de análise exergoambiental apresentada recentemente por Meyer *et al.* (2009). Os resultados obtidos para as variáveis exergoambientais estiveram em conformidade com a análise proposta pelos autores. No modelo proposto aqui, no entanto, considerou-se que todo o impacto estava atribuído ao produto final. Conclui-se que, do mesmo modo que na avaliação do ciclo de vida, os resultados obtidos da análise exergoambiental estão sujeitos às decisões tomadas na elaboração do modelo.
- A análise exergoambiental propôs a alocação do impacto ambiental aos fluxos de exergia. A escolha de uma unidade funcional, durante a análise de ciclo de vida, relacionada a determinado fluxo de exergia, possibilita o desenvolvimento da metodologia. No caso aqui estudado, a unidade funcional correspondeu à unidade de energia elétrica, considerada como exergia pura.
- As variáveis exergoambientais apresentaram valores consistentes com os valores pré-estabelecidos e comportaram-se conforme previsto, nos dois cenários avaliados. No entanto, a proposta de análise exergoambiental não estabeleceu limites teóricos para a análise dessas variáveis que possam ser tomados como referência para o melhoramento global do sistema analisado.
- Foi proposto um parâmetro de desempenho para o sistema denominado fator exergoambiental global ( $f_{GEE}^{ea}$ ), que considera

a variável exergia e o impacto estimado a partir do método de avaliação do ciclo de vida para a categoria de impacto mudança climática, considerando uma condição ideal como parâmetro fixo de comparação. Os resultados mostraram que esse fator constitui um parâmetro efetivo para mensurar o grau de melhoramento atingido pelo sistema, nos cenários avaliados.

## 6.2 Sugestões para futuros trabalhos

Com base nos resultados obtidos e nas dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da tese, são apontados os seguintes temas que podem servir de base para futuros trabalhos:

- Implementar a proposta metodológica a outros sistemas de conversão de energia, visando o melhoramento de sua estrutura.
- Desenvolver trabalhos experimentais no gerador de vapor, tendo em vista a avaliação energética em função da participação da biomassa no processo de combustão, considerando combustão da mistura carvão - biomassa, deposição de cinzas e emissões para diferentes condições de operação. Esses trabalhos podem incluir a avaliação de diversas classes de biomassa.
- Desenvolver modelos permitam uma adequada aproximação da parcela de GEE evitado pela não decomposição da biomassa nas lavouras.
- Analisar o aproveitamento da biomassa residual a partir da avaliação de técnicas de adensamento como a briquetagem ou a pelletização, considerando, além da viabilidade ambiental, aspectos econômicos relacionados às diferentes etapas identificadas na rota do combustível.
- Construir uma base de dados local referente ao inventário de ciclo de vida de processos de conversão de energia.
- Estudar logísticas adequadas em torno das possíveis rotas de abastecimento e aproveitamento da biomassa residual proveniente de culturas típicas no Brasil em sistemas de conversão de energia.

# *Referências*

ABNT14040. *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida. Princípios e estrutura*. 2009.

ABNT14044. *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. 2009.

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.;  
BALBINOT, A. A. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. *Ciencia Rural*, v. 32, p. 1073–1081, 2002.

BAZZO, E. *Geração de Vapor*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - santa Catarina - Brasil: Editora da UFSC, 1995. 216 p.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. *Thermal Design and Optimization*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 1996.

BORMAN, G. L.; RAGLAND, K. N. *Combustion Engineering*. [S.l.]: WCB/McGraw-Hill, 1998. 613 p.

BOYANO, A.; BLANCO-MARIGORTA, A. M.; MOROSUK, T.; TSATSARONIS, G. Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. *Energy*, v. 36, p. 2202–2214, 2011.

CARLIN, N. *Optimum usage and economic feasibility of animal*

*manurebased biomass in combustion systems*. Tese (Doutorado) — Texas A&M University, 2009.

CONAB. 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>.

CORNELISSEN, R. L. *Thermodynamics and sustainable development. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility*. Tese (Doutorado) — University of Twente, Netherlands, 1997.

EBERHARDT, D. S.; A., L. M.; S., A.; PESSOA, M. C. P. Y.; NOLDIN, J. A.; OLIVEIRA, L. Emissão de metano em arroz irrigado em santa catarina. In: PALOTTI, G. e E. (Ed.). *VI Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 163–166.

ECO-INDICATOR 99 MANUAL FOR DESIGNERS. *Eco-indicator 99 Manual for Designers*. The Netherlands, October 2000. Eco99.

EPAGRI/CEPA. *Síntese anual da agricultura de Santa Catarina 2009-2010*. [S.l.], 2010.

EPRI. *Biomass Cofiring: Field Test Results: Summary of Results of the Bailly and Seward Demonstrations*. [S.l.], 1999.

FRANGOPOULOS, C.; CARALIS, Y. Method for taking into account environmental impacts in the economic evaluation of energy systems. *Energy Conversion and Management* v. 38, p. 1751-1763, 1997, v. 38, p. 1751–1763, 1997.

FTC, F. T. C. 2011. Disponível em: <<http://www.ftc.com.br/>>.

GONZÁLEZ, A.; SALA, J. M.; FLORES, I.; LÓPEZ., L. M. Application of thermoeconomics to the allocation of environmental

loads in the life cycle assessment of cogeneration plants. *Energ*, v. 28, p. 557–574, 2003.

HAMELINCK, C.; SUURS, R.; FAAIJ, A. International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, v. 29, p. 114–134, 2005., v. 29, p. 114–134, 2005.

HANSSON, J.; BERNDES, G.; JOHNSON, F.; KJARSTAD., J. Co-firing biomass with coal for electricity generation - an assessment of the potential in eu27. *Energy Policy*, v. 37, p. 1444–1455, 2009.

HONDO, H. Life cycle ghg emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, v. 30, p. 2042–2056, 2005.

IBGE. *Produção Agrícola Municipal, Culturas temporárias e permanentes*. [S.l.], 2009.

IEA. *Key World Energy Statistics*. [S.l.], 2009.

IEA, I. E. A. *Key World Energy STATISTICS*,. [S.l.], 2011.

IFK. *Reporto of rice straw and Brazilian coal analyses*. [S.l.], 2009.

IPCC. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 2 Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. [S.l.], 2007.

ISO/FDIS-14040. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. [S.l.], 2006.

ISO/FDIS-14044. *Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines*. [S.l.], 2006.

ISO/TR-14047. *Environmental management - Life cycle impact assessment - Exemples of application of ISO 14042*. [S.l.], 2003.

JENKINS, B. M.; SUMMERS, M.; BAKKER-DHALIWAL, R.; BERNHEIM, L.; LEE, H.; HUISMAN, W.; YAN, L. Equipment performance, costs, and constraints in the commercial harvesting of rice straw for industrial applications. *Annual International Meeting ASAE*, Paper No. 006035, 2000.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; CASAGRANDE, J.; CRUZ, R.; OLIVEIRA, T.; KERN, M.; LEVANDOWSKI, J.; ROLIM, S. O potencial de coalbed methane (cbm) na jazida da santa terezinha modelagem 3d e avaliação do poço de exploração cbm001-st-rs. *Revista Brasileira de Geociência*, v. 38 (2-suplemento), p. 3-17, 2008.

KAPPEJAN, S. V. L. A. J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. [S.l.: s.n.], 2008.

KOTAS, T. J. *The exergy method of thermal plant analysis*. [S.l.]: Krieger Publishing Company, 1995.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. Speco: A systematic and general methodology fot calculating afficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, v. 31, p. 1257-1289, 2006.

LIMA, M. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; LIGO, M. A. V. *Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa*. [S.l.], 2006.

LOMBARDI, L. Life cicle assessment comparation of technical



solutions for co2emissions reductions in power generation. *Energy Conversion and Management*, v. 44, p. 93–108, 2003.

MACIEJEWSKA, A.; VERINGA, H.; SANDERS, J.; PETEVES, S. D. *Co-firing of biomass with coal: Constraints and role of biomass pre-treatment*, Joint Research Centre Institute for energy. [S.l.], 2006.

MEYER, L.; TSATSARONIS, G.; BUCHGEINSTER, J.; SCHEBEK, L. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, v. 34, p. 75–89, 2009.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhço da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 546–552, 2008.

MME, M. de Minas e E. *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL*. [S.l.], 2011.

ODEH, N. A.; COCKERILL, T. T. Life cycle analysis of uk coal fire power plant. *Energy Conversion and Management*, v. 49, p. 212–220, 2008.

PELLEGRINI, L.; OLIVEIRA, S. Thermo-economic-environmental analysis and otimization applied to the combine production of sugar, ethanol and electricity. In: *The 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. [S.l.: s.n.], 2009.

PEREIRA, F.; BAZZO, E.; OLIVEIRA, A. Biomass co-firing as an alternative technology for a clean coal electric generation in brasil. In: *20th International Congress of Mechanical Engineeering COBEM*. [S.l.: s.n.], 2009.

PORTHA, J.; LOURET, S.; PONS, M.; JAUBERT, J. Estimation of the environmental impact of a petrochemical process using coupled lca and exergy analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, p. 291–298, 2010.

REPIC, B. S.; KOSTIC, Z. G.; MARTINOVIC, M. P.; GAIGER, A. B. Modeling of nitrogen oxide release in coal combustion. *Journal of Engeneering and Physics and Thermophysics*, v. 72, p. 1999, 1999.

ROYO, J.; GARCÍA, D.; SEBASTIAN, F.; CANALÍS, P. La co-combustión: Una alternativa para incrementar la contribución de la biomasa en el mercado eléctrico español. *Energía: Ingeniería energética y medio ambiente*, v. 185, p. 68–77, 2005.

SCHNEIDER, C. H. *Controle da drenagem ácida de minas na mineração de carvão de santa catarina: caso da mina UM II - Verdinho*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2006.

SCIUBBA, E. Beyond thermoeconomics? the concept of extended. *Exergy*, v. 2, p. 68–84, 2001.

SüFFERT, T. *Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina - Porto Alegre, Informe de Recursos Minerais, Série Oportunidades Minerais*. [S.l.], 1997.

SILVA, R.; PIRES, M.; AZEVEDO, C. M. N.; FAGUNDES, L. Monitoring light hydrocarbons in brazilian coal mines and in confined coal samples. *International Journal of Coal Geology*, v. 84, p. 269–275, 2010.

SILVESTRINI, V. *Qué es la entropía*. [S.l.]: Grupo editorial NORMA, 2000.

- SOARES, M. R. *Relatório final sobre transporte de palha de arroz ao interior do complexo termelétrico Jorge Lacerda*. [S.l.], 2011.
- SOUZA, M. G. *Avaliação de ciclo de vida do carvão energético*. [S.l.], 2007.
- SPATH, P. L.; MANN, M. K.; KERR, D. R. *Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production*. 1617 Cole boulevard, Golden Colorado 80401-3393, 1999.
- SULLIVAN, K.; MEIJER, R. *Co-firing biomass with coal. Balancing US carbon objectives, energy demand and electricity affordability*. [S.l.], 2009.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D.; STEWARD, F. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- SZARGUT, J.; ZIEBIK, A.; STANEK, W. Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost. *Energy Conversion and Management*, v. 43, p. 1149–1163, 2002.
- TILLMAN, D. A. Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, p. 365–384, 2000.
- TOFTEGAARD, M.; BRIX, J.; JENSEN, P.; GLARBORG, P.; JENSEN, A. Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 36, p. 581–625, 2010.



# ***APÊNDICE A***

## ***Rota do carvão: equipamentos e consumos***

A seguir, são apresentadas as informações referentes aos equipamentos e consumos associados à rota do carvão, seguindo as etapas definidas na fronteira do problema. A informação foi coletada durante o trabalho de reconhecimento dos processos, de entrevistas com o pessoal de operação e da revisão bibliográfica realizada, principalmente, no Centro Tecnológico de Carvão Limpo (SATC).

### **A.1 Primeira etapa: processo de mineração**

A Tabela A.1 indica a quantidade e a potência nominal dos equipamentos que operam no subsolo para a extração do carvão ROM das galerias subterrâneas.

A Tabela A.2 mostra as informações referentes às esteiras transportadoras utilizadas no subsolo para o transporte do minério. É importante lembrar que o sistema de transporte do carvão no interior da mina depende da distância entre o ponto de localização da lavra e a caixa de embarque, na entrada do túnel de saída, conhecido como plano inclinado. As esteiras são classificadas pelo consumo nominal, o qual varia entre 37 kW e 184 kW.

A Tabela A.3 apresenta os dados referentes aos equipamentos que

Tabela A.1 – Equipamentos e consumos nominais referentes ao processo de mineração subterrânea.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Perfuratriz frontal	10	44,2	442
Perfuratriz de teto (SECOMA)	7	36,8	257,6
Carregadeiras (BOB CAT)	8	18,4	147,2
MT'S	14	36,8	515,2
Jumbo	1	44,2	44,2
Sondas	3	44,2	132,6
Máquinas de solda	8	11,0	88,0
Compressores	3	55,2	165,6
Total	-	-	1.792,4

Tabela A.2 – Consumos nominais referentes às esteiras transportadoras no subsolo.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Esteira tipo 1	1	37	37
Esteira tipo 2	5	55	275
Esteira tipo 3	13	110	1.430
Esteira tipo 4	1	147	147
Esteira tipo 5	2	184	368
Total	-	-	2.257

fazem parte da caixa de embarque localizada na entrada do plano inclinado.

Tabela A.3 – Equipamentos e consumos nominais referentes à caixa de embarque.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Esteira transportadora TC6	1	22	22,0
Esteira transportadora TC5	1	74	74,0
Alimentadores	5	37	18,5
Total	-	-	114,5

A Tabela A.4 registra os dados sobre os exaustores utilizados na ventilação da mina.

Tabela A.4 – Consumos nominais referentes aos exaustores de ventilação.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Exaustor tipo 1	10	15,0	150,0
Exaustor tipo 2	9	11,0	99,0
Exaustor tipo 3	4	3,7	14,8
Exaustor tipo 4	1	147,0	147,0
Exaustor tipo 5	1	368,0	368,0
Total	-	-	778,8

A Tabela A.5 identifica as bombas utilizadas para a extração da água da mina. A Tabela A.6 mostra o inventário relacionado aos equipamentos auxiliares que apoiam o processo de mineração.

As Tabela A.7 e A.8 apresentam, respectivamente, as informações sobre os equipamentos utilizados nos processos de britagem e lavagem, durante o beneficiamento do carvão.

A Tabela A.9 apresenta os dados sobre a quantidade de minério extraído e de energia elétrica consumida, tomando como base o ano de 2010.

Tabela A.5 – Consumos nominais referentes ao sistema de bombeamento da DAM.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Bomba tipo 1	11	1,8	19,8
Bomba tipo 2	35	3,7	129,5
Bomba tipo 3	2	5,5	11,0
Bomba tipo 4	38	11	418,0
Bomba tipo 5	2	14,7	29,4
Bomba tipo 6	1	29,5	29,5
Bomba tipo 7	1	36,8	36,8
Bomba tipo 8	4	55,2	220,8
Bomba tipo 9	2	92	184,0
Bomba tipo 10	3	184	552,0
Total	-	-	1.630,8

Considerando a média mensal, o indicador que relaciona o consumo elétrico com o carvão energético produzido apresenta o seguinte valor:

$$\Rightarrow I_{\text{eletricidade}} = \frac{1.937.685 \text{ kWh/mês}}{42.000.000 \text{ kg CE/mês}} = 4,61 \times 10^{-2} \text{ kWh/kg CE}$$

## A.2 Segunda etapa: transporte

A empresa Ferrovia Tereza Cristina S.A. utilizou para sua operação, durante o ano de 2010, o total de 10 locomotivas movimentadas a diesel, cada uma apresentando potência nominal em torno de 1000 kW. A Tabela A.10 mostra a distribuição das locomotivas. A frota de vagões atinge uma quantidade de 449 unidades. Essas e outras informações sobre a Ferrovia Tereza Cristina podem ser encontradas em FTC (2011)

A Tabela A.11 apresenta o histórico total de carvão CE4500 movimentado e o volume de óleo diesel utilizado em 2010 FTC (2011). Segundo dados fornecidos pela companhia, em 2010 foram movimentados aproximadamente 2,6 milhões de toneladas de carvão energético. Ao relacionar o consumo do diesel com o carvão transportado, obtém-se um indicador de 0,57 litros de combustível por tonelada de carvão movimentada.

$$\dot{m}_{\text{diesel}} = \frac{7,31}{\text{tku} \times 10^3} \times 16.900 \text{ tku} \times 10^3 = 123.370 \text{ l}$$



Tabela A.6 – Consumos nominais referentes aos equipamentos auxiliares.

Locação	Potência total [kW]
Carpintaria	60
Guincho da boca do poço	97
Afiação de brocas	26
Fábrica de parafusos	36
Oficina	247
Outros	30
Total	496

Tabela A.7 – Equipamentos referentes ao processo de britagem

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Peneiras classificadoras	2	22,0	44,0
Transp. cata manual 301A	1	5,5	5,5
Transportador. TC 301C	1	15,0	15,0
Transportador. TC 301 B	1	15,0	15,0
Transportador retomada 201A	1	37,0	37,0
Transportador emergência 201	1	18,0	18,0
Transp. britador TC 301	1	55,0	55,0
Bomba bicos nebulizadores	1	11,0	11,0
Britador mandíbula	1	55,0	55,0
Britador cônico	2	110,0	220,0
Moto bomba túnel TC 201	1	2,0	2,0
Eletroímã	1	3,7	3,7
Central hidráulica cata manual	2	3,0	6,0
Bomba, poço artesianos	1	2,3	2,3
Guincho britagem	1	11,0	11,0
Total	-	-	489,5

$$\Rightarrow \text{em média mensal, tem-se: } \frac{123.370 \text{ l}}{216.667 \text{ t}_{\text{CE}}} = 0,57 \frac{\text{l}}{\text{t}_{\text{CE}}}$$

Tabela A.8 – Equipamentos referentes ao processo de lavagem.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]	Potência total [kW]
Alimentadores 302, 1, 2, 3, 4, 5	6	3,0	18,0
Acionamento TC401	1	110,0	110,0
Elevador caçamba B800	1	15,0	15,0
Elevador caçamba B1000	2	15,0	30,0
Talha elevadores	1	6,0	6,0
Flutuador	6	22,0	132,0
Pás coletoras flutuador	4	2,2	8,8
Peneira 409.1, 2	2	15,0	30,0
Peneira 409.4, 5	2	18,0	36,0
Central hidráulica	2	3,7	7,4
Esteira transp. TC 501	1	18,0	18,0
Peneiras desag. 426	8	3,7	29,6
Peneiras desag 425	10	3,7	37,0
Bomba B116	1	22,0	22,0
Bombas polpa 420.1, 2	2	55,0	110,0
Bombas polpa 420, 3	1	22,0	22,0
Bombas polpa 421.1, 2, 3	3	92,0	276,0
Bombas selagem 450. 4,5	2	11,0	22,0
Bomba polpa 450. 1, 2	2	110,0	220,0
Bomba polpa 422	1	74,0	74,0
Bomba polpa V1	1	22,0	22,0
Soprador JIG	1	147,0	147,0
Soprador flutuador	1	55,0	55,0
Compressor válvulas	1	7,4	7,4
Bombas EDR 1	3	55,0	165,0
Bombas EDR 2	2	37,0	74,0
BOMBA EDR 3	1	147,0	147,0
Bomba EDR 3	1	74,0	74,0
Agitadores trat. Água	4	7,5	30,0
Bomba bacia flutuado	1	11,0	11,0
Roller jato granalha	1	74,0	74,0
Compressor jato	1	7,4	7,4
Bomba água potável	1	11,0	11,0
Outros			83,7
Total			2.136,3

Tabela A.9 – Produção anual no processo miração.

Mês	ROM [t]	CE4500 [t]	Energia [kWh]
Janeiro	99.615	43.863	2.190.526
Fevereiro	98.488	41.897	2.035.842
Março	116.413	52.379	2.276.239
Abril	92.026	39.182	2.095.007
Mai	100.302	45.677	2.234.349
Junho	90.397	37.110	2.181.922
Julho	101.479	40.473	1.819.083
Agosto	102.195	44.252	1.818.215
Setembro	95.249	34.298	1.664.613
Outubro	92.892	34.105	1.633.105
Novembro	105.615	44.117	1.651.621
Dezembro	111.434	46.653	1.651.699
Total	1.206.105	504.006	23.252.221
Média mensal	100.508	42.000	1.937.685

Tabela A.10 – Características das locomotivas da Ferrovia Tereza Cristina.

Modelo	Quantidade	Potência nominal [hp]	Potência nominal [kW]	Peso aderente [t]
GM-G12	8	1.425	1.063	73
GM-GL8	1	950	709	59
GM-G22U	1	1.650	1.231	73
Total	10	14.000	10.444	-

Tabela A.11 – Indicadores associados ao transporte do carvão.

Mês	Total	[tu] [tku $\times 10^6$ ]	Combustível [l/tku $\times 10^6$ ]	Combustível [l $\times 10^6$ ]
Janeiro	20,2	269,3	7,0	141,4
Fevereiro	18,7	249,3	7,2	134,6
Março	21,1	281,3	6,9	145,5
Abril	19,2	256,0	7,0	134,4
Maio	18,4	245,3	6,3	115,9
Junho	16,6	221,3	7,3	121,1
Julho	15,4	205,3	7,8	120,1
Agosto	14,6	194,6	8,0	116,8
Setembro	13,5	180,0	7,7	103,9
Outubro	13,7	182,6	7,6	104,1
Novembro	15,8	210,6	7,3	115,3
Dezembro	15,3	204,0	7,1	108,6
Média anual	16,9	225,0	7,3	121,8

### A.3 Terceira etapa: processamento (pré-combustão)

A Tabela A.12 mostra o consumo nominal dos equipamentos utilizados no recebimento do carvão e no abastecimento das unidades UTLA 1 e 2.

Tabela A.12 – Equipamentos e consumos nominais na seção de recebimento do carvão energético.

Equipamento	Quantidade	Potência nominal [kW]
Vibrador vagões	1	88,0
Separador magnético	1	1,0
Peneira vibratória	2	29,0
Alimentador TC-37	1	9,0
Esteira transp. TC-37	1	74,0
Esteira transp. TC-38	1	74,0
Esteira transp. TC-23	1	92,0
Esteira transp. TC-21	1	74,0
Esteira transp. TC-01	1	4,0
Esteira transp. TC-01	1	8,0
Esteira transp. TC-02	1	10,5
Esteira transp. TC-03	1	18,5
Esteira transp. TC-04	1	3,7
Esteira transp. TC-05	1	3,7
Empilhadeira móvel	4	55,0
Recuperadora	4	97,0
Motor mov. vagões	1	18,5
Total		659,9



## ***APÊNDICE B***

### ***Rota da biomassa: equipamentos e consumos***

A seguir, são apresentados dados sobre os equipamentos e consumos associados à rota da biomassa, seguindo as etapas definidas na fronteira do problema. A informação foi coletada a partir do trabalho de campo realizado pela empresa Consultoria Empreendimentos e Assessoria (CEIA), para o aproveitamento da biomassa residual.

#### **B.1 Primeira etapa: processo na lavoura**

Conforme visto no Capítulo 4, o trabalho para a obtenção dos fardos na lavoura consiste, basicamente, em quatro operações. A primeira é o segamento, que consiste em realizar um corte no talho da planta, a uma altura próxima do solo, visando um maior aproveitamento da biomassa. A segunda operação é denominada enleiramento, que consiste em movimentar a palha em direção ao centro da máquina, formando a leira, para facilitar e melhorar o desempenho da enfardadeira. A terceira operação é o enfardado, que tem por objetivo adensar a biomassa para facilitar seu transporte. Finalmente, a quarta operação consiste no carregamento dos fardos dispersos na lavoura até o setor de reunião para seu posterior traslado até o ponto de utilização. A Tabela B.1 mostra as características dos equipamentos utilizados na lavoura para a obtenção dos fardos.

Tabela B.1 – Características referentes à maquinaria utilizada na lavoura.

Equipamento	Quantidade	Características
Segadeira	1	Marca: Vicon; Modelo: Extra 832 R; Dimensões: 8 discos de corte - 3,2 m de largura de corte, peso 1885 kg; Tractor: Case MX 135, 135 cv
Enleiradeira	1	Marca e modelo: não identificada. Tractor: New Holland TL 55, 55 cv
Enfardadeira	1	Marca: Vicon; Modelo: LB 12200 R; Dimensões: largura 2,76 m, altura 2,7 m e comprimento 7,8 m, peso 8.500 kg, Tractor: New Holland TM 180 - 180 cv
Tratores	5	Porte médio, 3 Massey Fergusson 290, 1 Massey Fergusson 292 e 1 John Deere 5403



Segadeira



Enleiradeira



Enfardadeira

Tratores de grande porte



Tratores de médio porte

Figura B.1 – Equipamentos utilizados na lavoura.



Conforme visto na Figura B.1, os equipamentos utilizados nas operações trabalham acoplados a tratores. O consumo de diesel estimado foi de 16  $l_{\text{diesel}}/\text{h}$  para tratores de grande porte, usados nas três primeiras operações, e de 9  $l_{\text{diesel}}/\text{h}$  para tratores de médio porte, utilizados na coleta dos fardos dentro da lavoura.

## B.2 Segunda etapa: transporte

O transporte foi realizado com três caminhões, com capacidade volumétrica de 18 fardos por carga completa. a Tabela B.2 apresenta informação dos mesmos.

Tabela B.2 – Características referentes aos caminhões utilizados no transporte dos fardos.

Caminhão	Quantidade	Características
Tipo 1	2	Marca: Mercedes-Benz ; Modelo: 1318; Capacidade de carga: 9.000 kg; Consumo específico de combustível 205 g/kWh a potência máxima de 130 kW e 2.200 rpm
Tipo 2	1	Marca: Mercedes-Benz ; Modelo: 1311; Capacidade de carga: 9.000 kg

A Figura B.2 mostra os caminhões utilizados. O consumo diesel associado foi da ordem de 20  $l_{\text{diesel}}/\text{h}$ , em operação contínua.



Fardos sendo carregados na lavoura e descarregados na usina.

Figura B.2 – Caminhões utilizados no transporte da biomassa.

### B.3 Terceira etapa: processamento (pré-combustão)

A Tabela B.3 apresenta os consumos nominais dos equipamentos do sistema de processamento pré-combustão da biomassa. A Figura B.3 mostra o aspecto geral do sistema para o processamento pré-combustão da biomassa. O fluxograma detalhado dos processos é encontrado na Figura 4.15 (Capítulo 4).

Tabela B.3 – Equipamentos e consumo nominal referentes ao sistema de processamento (pré-combustão) da biomassa.

Equipamento	Potência nominal [kW]
Transportador de correias	4,4
Desenfardador	44,1
Aliment. e mesa vibratória	5,7
Ventilador picador	44,1
Ciclone	1,5
Moinhos	110,3
Silo, rosca e elevador de canecas	12,9
Compressores transp. pneumático	22,1
Ventilador soprador	14,7
Ventilador despoerimento	29,4
Filtro manga	1,3
Total potência elétrica	290,5
Total potência térmica trocador de calor	390,0

A Tabela B.4 fornece informações obtidas a partir do relatório técnico apresentado por Soares (2011), acerca dos trabalhos correspondentes à primeira e à segunda etapa da rota da biomassa, realizados no período entre 02 de maio e 27 de junho de 2011.



Figura B.3 – Sistema pré-combustão da biomassa.

Tabela B.4 – Informações referentes aos trabalhos obtenção de fardos.

Item	Potência nominal
Peso médio por fardo	354 kg
Número produzidos	3.141 fardos
Produção média diária	87 fardos
Meta de produção	2.000 t
Área trabalhada	222 ha
Área necessária	400 ha
Horas Trabalhadas (Enfardadora)	177,3 em 36 dias
Horas Trabalhadas (Segadora)	189,5 em 34 dias
Horas Trabalhadas (Enleirador)	164,0 em 26 dias
Toneladas transportadas	1.079
Fardos transportados	3.048
Fardos transportados por carga	18
Fardos danificados	91 (2,89%)
Cargas Transportadas	171



# APÊNDICE C

## *Análise termodinâmica do ciclo*

A Figura C.1 mostra o ciclo termodinâmico analisado. Uma descrição detalhada do mesmo é apresentada na Seção 4.1.1.

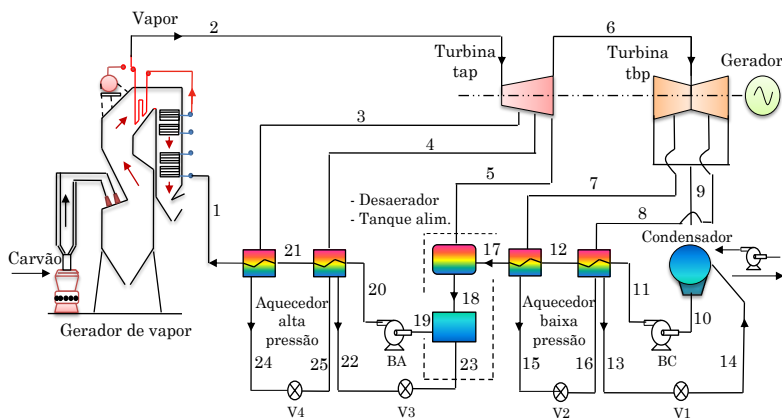


Figura C.1 – Ciclo termodinâmico da UTLA-1.

Para a análise da primeira e da segunda lei da termodinâmica, considera-se uma eficiência de 85% no gerador de vapor (GV) e os valores operacionais apresentadas na Tabela C.1. Segundo o informe técnico apresentado pela EPRI (1999), durante a operação em combustão combinada, a eficiência energética do gerador de vapor apresenta perda de 0,5% de eficiência por cada 10% de biomassa entrando ao processo em

base mássica. O modelo termodinâmico proposto considera um comportamento similar em base energética.

Tabela C.1 – Características operacionais da UTLA-1.

Parâmetro	Nominal	Operação†
Temperatura água entrada GV	210 °C	210 °C
Pressão água entrada GV	98,1 bar	96,8 bar
Temperatura vapor saída GV	515 °C	510 °C
Pressão vapor saída GV	90,25 bar	89 bar
Potência elétrica gerada	50 MWe	45,8 MWe
Fluxo de vapor gerado	165 t/h	185 t/h

†tomados em 14/07/2010.

A seguir, são apresentadas as equações utilizadas na avaliação termodinâmica da usina nos dois cenários: o cenário A (operação atual 100% carvão) e o cenário B (operação em combustão combinada 90% carvão - 10% biomassa). O modelo termodinâmico foi desenvolvido no programa EES sob as hipóteses de: regime permanente; estado de referência para exergia física (101.325 Pa, 25 °C); mudança na energia cinética e na energia potencial desprezível, e perda da água através do desaerador desprezível.

As equações de balanço de massa, energia e exergia consideradas são:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (\text{C.1})$$

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{W}_{vc} = \sum_s h_s \dot{m}_s - \sum_e h_e \dot{m}_e \quad (\text{C.2})$$

$$\sum_s \dot{m}_s e_s^{ph} - \sum_e \dot{m}_e e_e^{ph} = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) + \dot{W} - \dot{E}_D \quad (\text{C.3})$$

onde  $\dot{m}$  é o fluxo mássico;  $\dot{Q}$  e  $\dot{W}$  são o calor e o trabalho;  $e$ ,  $s$  e  $j$  subscritos, são, respectivamente, a entrada, a saída e o fluxo considerado;  $\dot{E}_D$  é a exergia destruída, e  $\dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)$  a quantidade que indica o fluxo de exergia associado ao fluxo de calor.

A eficiência exergetica, assim como a exergia destruída para os componentes indicados na Figura C.1, é calculada conforme apresentado na Tabela C.2.

Os parâmetros de desempenho avaliados para o ciclo termodinâmico foram: a eficiência de primeira e segunda lei da termodinâmica ( $\eta_I$ ,  $\eta_{II}$ ), a exergia total destruída ( $\dot{E}_{D,total}$ ) e a razão de destruição de exergia ( $y_{D,n}$ ), como indicado a seguir:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_e}{(PCI \dot{m})_{comb}} \quad (C.4)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{E}_{comb}^{ch}} \quad (C.5)$$

$$\dot{E}_{D,total} = \sum_n \dot{E}_{D,n} \quad (C.6)$$

$$y_{D,n} = \frac{\dot{E}_{D,n}}{\dot{E}_{D,total}} \quad (C.7)$$

Outro parâmetro considerado é o fluxo de massa dos combustíveis ( $\dot{m}_{carvão}$  e  $\dot{m}_{biomassa}$ ), calculado a partir do requerimento energético no gerador de vapor e do poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis, estimado com base na relação apresentada por Bazzo (1995). As Equações. (C.8) e (C.9) expressam o poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS), respectivamente:

$$PCI_{comb} = PCS_{comb} - 2.440[9 m_{f,H} + m_{f,H_2O}] \quad (C.8)$$

$$PCS_{comb} = 33.900 m_{f,C} + 141.800 \left[ m_{f,H} - \frac{m_{f,O}}{8} \right] + 9.200 m_{f,S} \quad (C.9)$$

Nas equações acima,  $m_{f,C}$ ,  $m_{f,H}$ ,  $m_{f,O}$  e  $m_{f,S}$  são, respectivamente, as frações de massa do carbono, do hidrogênio, do oxigênio e do enxofre, indicada em kg da espécie  $i$  por kg combustível.

Tabela C.2 – Exergia destruída e eficiência exérgica dos equipamentos do ciclo termodinâmico

Equipamento	Exergia destruída, $\dot{E}_{D,i}$ [MW]	Eficiência exérgica, $\eta_{II,i}$ [%]
Gerador de vapor	$\dot{E}_{D,caldeira} = \dot{E}_{comb}^{ch} - (\dot{E}_2^{ph} - \dot{E}_1^{ph})$	$\eta_{II,caldeira} = \frac{\dot{E}_2^{ph} - \dot{E}_1^{ph}}{\dot{E}_{comb}^{ch}}$
Turbina alta pressão	$\dot{E}_{D,tap} = \dot{E}_2^{ph} - (\dot{E}_3^{ph} + \dot{E}_4^{ph} + \dot{E}_5^{ph} + \dot{E}_6^{ph}) + \dot{W}_{tap}$	$\eta_{II,tap} = \frac{\dot{W}_{tap}}{(\dot{E}_3^{ph} + \dot{E}_4^{ph} + \dot{E}_5^{ph} + \dot{E}_6^{ph}) - \dot{E}_2^{ph}}$
Turbina baixa pressão	$\dot{E}_{D,tbp} = \dot{E}_6^{ph} - (\dot{E}_7^{ph} + \dot{E}_8^{ph} + \dot{E}_9^{ph}) + \dot{W}_{tbp}$	$\eta_{II,tbp} = \frac{\dot{W}_{tbp}}{(\dot{E}_7^{ph} + \dot{E}_8^{ph} + \dot{E}_9^{ph}) - \dot{E}_6^{ph}}$
Condensador <sup>a</sup>	-	-
Aquecedor água baixa pressão 1	$\dot{E}_{D,abp(1)} = \dot{E}_8^{ph} + \dot{E}_{16}^{ph} - \dot{E}_{13}^{ph} - (\dot{E}_{12}^{ph} - \dot{E}_{11}^{ph})$	$\eta_{II,abp(1)} = \frac{\dot{E}_{12}^{ph} - \dot{E}_{11}^{ph}}{\dot{E}_8^{ph} + \dot{E}_{16}^{ph} - \dot{E}_{13}^{ph}}$
Aquecedor água baixa pressão 2	$\dot{E}_{D,abp(2)} = \dot{E}_7^{ph} - \dot{E}_{15}^{ph} - (\dot{E}_{17}^{ph} - \dot{E}_{12}^{ph})$	$\eta_{II,abp(2)} = \frac{\dot{E}_{17}^{ph} - \dot{E}_{12}^{ph}}{\dot{E}_7^{ph} - \dot{E}_{15}^{ph}}$
Aquecedor água alta pressão 1	$\dot{E}_{D,aap(1)} = \dot{E}_4^{ph} + \dot{E}_{25}^{ph} - \dot{E}_{22}^{ph} - (\dot{E}_{21}^{ph} - \dot{E}_{20}^{ph})$	$\eta_{II,aap(1)} = \frac{\dot{E}_{21}^{ph} - \dot{E}_{20}^{ph}}{\dot{E}_4^{ph} + \dot{E}_{25}^{ph} - \dot{E}_{22}^{ph}}$
Aquecedor água alta pressão 2	$\dot{E}_{D,aap(2)} = \dot{E}_3^{ph} - \dot{E}_{24}^{ph} - (\dot{E}_{1}^{ph} - \dot{E}_{21}^{ph})$	$\eta_{II,aap(2)} = \frac{\dot{E}_{1}^{ph} - \dot{E}_{21}^{ph}}{\dot{E}_3^{ph} - \dot{E}_{24}^{ph}}$
Tanque alimentação	$\dot{E}_{D,tanque} = (e_{18}^{ph} - e_{19}^{ph}) \times \dot{m}_{18} - (e_{19}^{ph} - e_{23}^{ph}) \times \dot{m}_{23}$	$\eta_{II,tanque} = \frac{(e_{19}^{ph} - e_{23}^{ph}) \times \dot{m}_{23}}{(e_{18}^{ph} - e_{19}^{ph}) \times \dot{m}_{18}}$
Desaerador	$\dot{E}_{D,desaerador} = (e_5^{ph} - e_{18}^{ph}) \times \dot{m}_5 - (e_{18}^{ph} - e_{17}^{ph}) \times \dot{m}_{17}$	$\eta_{II,desaerador} = \frac{(e_{18}^{ph} - e_{17}^{ph}) \times \dot{m}_{17}}{(e_5^{ph} - e_{18}^{ph}) \times \dot{m}_5}$

<sup>a</sup>Componente dissipador.



A exergia química específica ( $e_{comb}^{ch}$ ) é calculada a partir da correlação sugerida por Szargut, Morris e Steward (1988), conforme mostra a Equação (C.10).

$$e_{comb}^{ch} = (PCI_{comb} + h_{fg,H_2O} m_{f,H_2O}) \beta_{comb} + (e_S^{ch} - PCI_s) m_{f,s} + (e_{H_2O}^{ch}) m_{f,H_2O} \quad (C.10)$$

Tanto para o carvão quanto para a biomassa, o fator  $\beta_{comb}$  é calculado com as seguintes correlações:

$$\beta_{carvao} = 1,0437 + 0,014 \frac{m_{f,H}}{m_{f,C}} + 0,0968 \frac{m_{f,O}}{m_{f,C}} + 0,0467 \frac{m_{f,N}}{m_{f,C}} \quad (C.11)$$

$$\beta_{biomassa} = \frac{1,044 + 0,016 \frac{m_{f,H}}{m_{f,C}} - 0,3493 \frac{m_{f,O}}{m_{f,C}}}{[1 + 0,0531 \frac{m_{f,H}}{m_{f,C}}] + 0,0493 \frac{m_{f,N}}{m_{f,C}}} \quad (C.12)$$

nas quais,  $e_S^{ch}$  e  $e_{H_2O}^{ch}$  são, respectivamente, a exergia química específica do enxofre e a água, e  $m_{f,C}$ ,  $m_{f,H}$ ,  $m_{f,O}$  e  $m_{f,N}$  são as frações de massa do carbono, do hidrogênio, do oxigênio e do nitrogênio, respectivamente, obtidas a partir da análise gravimétrica dos combustíveis (Tabelas 4.2 e 4.4). Os resultados do modelo termodinâmico são apresentados na Tabela C.3.

Tabela C.3 – Parâmetros de desempenho (cenário A com 100% carvão e cenário B com participação da biomassa até 30% em base energética).

Parâmetro		Cenário A [100% carvão]	Cenário B [10%]	Cenário B [20%]	Cenário B [30%]
$\dot{m}_{comb}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\dot{m}_{carvão}$	8,40	7,6	6,8	6,0
	$\dot{m}_{biomassa}$	0	1,15	2,3	3,5
	$\dot{m}_{total}$	8,4	8,75	9,1	9,5
$\dot{E}_{comb}^{CH}$ [MW]	$\dot{E}_{carvão}$	162,7	147,3	131,7	116
	$\dot{E}_{biomassa}$	0	18,1	36,3	54,8
	$\dot{E}_{total}$	162,7	165,4	168	170,8
$\eta_I$	[%]	30,0	29,8	29,6	29,4
$\eta_{II}$	[%]	28,15	27,7	27,3	26,8
$E_D$ total	[MW]	116,9	119,6	122,2	124,9



## *APÊNDICE D*

### *Análise ambiental categoria de impacto: acidificação*

A seguir, são indicados os resultados para a categoria de impacto acidificação obtidos a partir do modelo de avaliação proposto, tanto para operação atual 100% carvão quanto para operação em combustão combinada. O método do Eco-indicador 99 foi utilizado para avaliar esta categoria de impacto. Tal como se explica no Eco-indicator 99 Manual for Designers (2000), o Eco-indicador padrão são números que expressam o total do impacto ambiental de processos ou produtos.

O método do Eco-indicador 99 oferece uma via pra avaliar varias categorias de impacto, apresentando os resultados numa pontuação única (Pt ou mPt), que, apesar de basear-se em valores próprios da Europa, pode ser utilizado para quantificar o impacto da categoria sendo avaliada considerando que o valor absoluto do ponto não é relevante já que seu principal propósito é poder comparar o impacto devido a diferentes produtos ou processos. Neste trabalho por exemplo, o valor do impacto está dado em mPt, e a observação que pode ser feita, é orientada a entender qual etapa das definidas na fronteira do problema, é a mais representativa ou apresenta uma maior contribuição no impacto total da categoria acidificação.

A Figura D.1 mostra a distribuição do impacto ambiental da categoria acidificação para o cenário A. O resultado mostra um comportamento similar ao da categoria de impacto mudança climática, enquanto os processos ligados à usina termoeletrica respondem pela maior parte do impacto gerado, correspondendo a 76,8% do total, o que é esperado,

considerando o alto teor de enxofre no carvão. É interessante ressaltar que a etapa correspondente ao processo de mineração representa 15,8% do total.

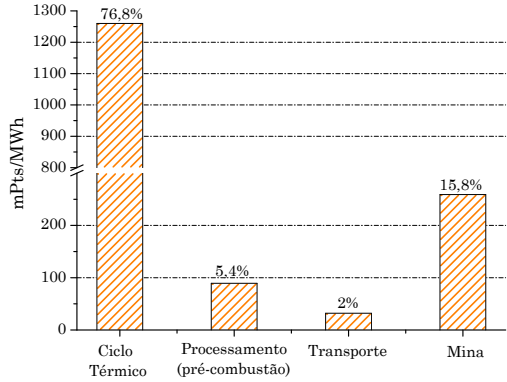


Figura D.1 – Categoria de impacto: acidificação (cenário A)

A Figura D.2 mostra os resultados obtidos para o cenário B com uma participação da biomassa de 10% em base energética. O comportamento é similar ao já analisado para o cenário A.

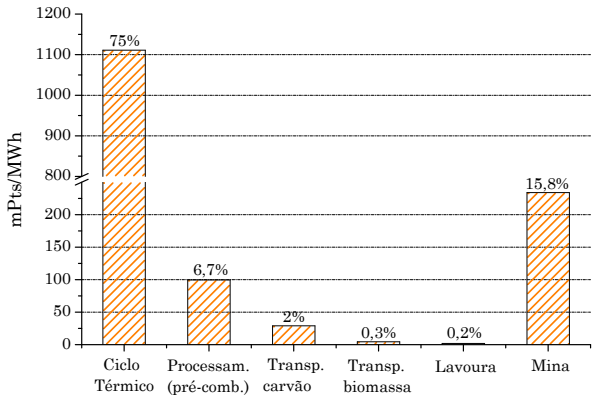


Figura D.2 – Categoria de impacto: acidificação (cenário B)

# APÊNDICE E

## Modelo de combustão

Considerando as características físicas dos combustíveis (carvão e biomassa), o modelo de combustão apresentado a seguir consiste em duas partes. Na primeira, é realizado o balanço de massa assumindo combustão completa e excesso de ar conhecido, o que permite identificar as frações molares das espécies ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{O}_2$ ) nos produtos de combustão em fase gasosa. A segunda parte considera o conceito de equilíbrio químico para calcular as frações molares de um número maior de espécies em diferente condição de pressão e temperatura. A Figura E.1 ilustra as duas partes do modelo: a entrada dos reagentes na câmara de combustão, a indicação das espécies obtidas como resultado do balanço de massa e as espécies consideradas pelo modelo de equilíbrio químico.

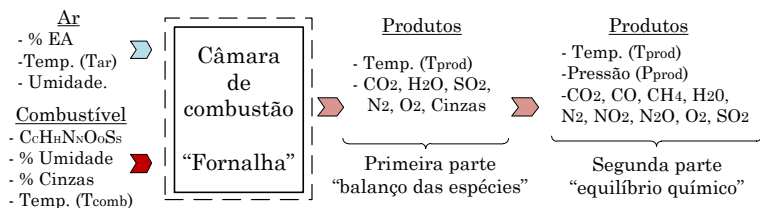
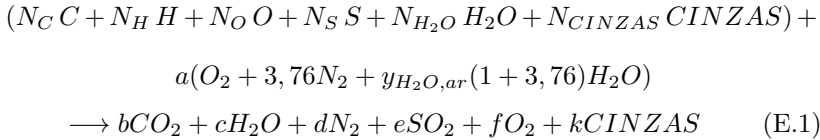


Figura E.1 – Esquema do modelo combustão.

O objetivo do modelo é identificar e quantificar as espécies geradas durante o processo de combustão para os dois cenários avaliados na

usina termoeleétrica, dando atenção às espécies consideradas relevantes para as categorias de impacto avaliadas neste estudo.

A Equação E.1 mostra o balanço para combustão completa de combustível sólido proposto a partir da análise elementar.



Na Equação E.1,  $N$  é a fração molar do elemento  $i$ , calculada a partir da gravimetria da análise elementar do combustível. Desse modo, no caso do carvão, a análise elementar (ver Tabela 4.2) indicou que o elemento carbono (C) representa 46,15% do total de sua massa, ou seja, a fração mássica do carbono ( $m_{f,C}$ ) é de 0,46. A fração molar é obtida a partir da fração mássica e da massa molar do elemento ( $M_{W_i}$ ) como mostra a Equação E.2:

$$N_i = \frac{m f_i}{M_{W_i}} \quad (E.2)$$

em que  $y_{H_2O,ar}$  é a fração molar da água que entra no processo junto ao ar da combustão ( $a$ ), calculada pela Equação E.3:

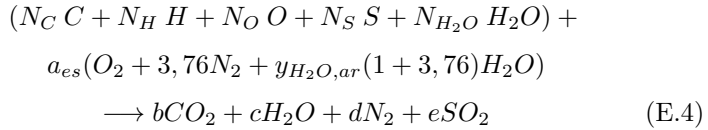
$$y_{H_2O,ar} = \frac{\phi p_g(T_{ar})}{p_{ar} - \phi p_g(T_{ar})} \quad (E.3)$$

onde  $\phi$  é a umidade relativa do ar,  $p_{ar}$  é a pressão do ar e  $p_g$  é a pressão de saturação em função da temperatura do ar.

Considerando as cinzas como inertes, a Equação E.1 apresenta seis incógnitas ( $a, b, c, d, e, f$ ) e apenas cinco elementos para escrever as equações de balanço ( $C, H, N, O, S$ ). Nota-se, desse modo, que o sistema encontra-se indeterminado, havendo necessidade de que seja proposta mais uma equação, com o intuito de solucionar o sistema de equações.

A solução é obtida reescrevendo a Equação E.1 para o caso estequiométrico, condição na qual o ar que entra no processo de com-

bustão corresponde ao ar estequiométrico ( $a_{es}$ ), tal como se mostra na Equação E.4. Observa-se que as cinzas não foram consideradas na equação de balanço.



A partir do balanço dos elementos apresentados nas Equações. E.5 a E.8, e do conhecimento do excesso de ar ( $EA$ ) indicado na Equação E.9, é possível dar solução ao modelo estequiométrico e obter as frações molares das espécies nos produtos de combustão, assim como determinar a fração molar do ar, o que permite resolver o sistema de equações para o balanço de massa inicialmente apresentado na Equação E.1.

$$Carbono (C) \Rightarrow b = N_C \quad (E.5)$$

$$Hidrogênio (H) \Rightarrow c = \frac{N_H}{2} + N_{H_2O} + a_{es}y_{H_2O,ar}(1 + 3,76) \quad (E.6)$$

$$Enxofre (S) \Rightarrow e = N_S \quad (E.7)$$

$$\begin{aligned} Oxigênio (O) \Rightarrow 2b + c + 2e &= N_O + N_{H_2O} + 2a_{es} + \\ & a_{es}y_{H_2O,ar}(1 + 3,76) \end{aligned} \quad (E.8)$$

$$EA = \left[ \frac{a}{a_{es}} - 1 \right] \quad (E.9)$$

Para o cenário da operação em combustão combinada, o modelo anterior pode ser adaptado seguindo o trabalho apresentado por Carlin (2009). Quando a biomassa entra ao processo de combustão a uma determinada razão, as frações molares das espécies formadas variam em função da composição química da mistura e dos fluxos de combustível

interagindo no processo, assim, para a análise, é definida a fração de massa da mistura ( $mf_{mistura}$ ), tal como é indicado na Equação E.10.

$$mf_{mistura} = \frac{\dot{m}_{biomassa}}{\dot{m}_{carvão} + \dot{m}_{biomassa}} \quad (E.10)$$

Uma vez identificada a fração de massa, é possível determinar um valor de equivalência para cada elemento em razão da quantidade de biomassa que é misturada ao carvão para a queima em combustão combinada. As Equações E.11 a E.17 mostram a fração molar de cada elemento na mistura.

$$N_{C,mistura} = (1 - mf_{mistura})N_{C,carvão} + mf_{mistura}N_{C,biomassa} \quad (E.11)$$

$$N_{H,mistura} = (1 - mf_{mistura})N_{H,carvão} + mf_{mistura}N_{H,biomassa} \quad (E.12)$$

$$N_{S,mistura} = (1 - mf_{mistura})N_{S,carvão} + mf_{mistura}N_{S,biomassa} \quad (E.13)$$

$$N_{O,mistura} = (1 - mf_{mistura})N_{O,carvão} + mf_{mistura}N_{O,biomassa} \quad (E.14)$$

$$N_{N,mistura} = (1 - mf_{mistura})N_{N,carvão} + mf_{mistura}N_{N,biomassa} \quad (E.15)$$

$$N_{Cinza,mistura} = (1 - mf_{mistura})N_{Cinza,carvão} + mf_{mistura}N_{Cinza,biomassa} \quad (E.16)$$



$$N_{H_2O,mistura} = (1 - mf_{mistura}) N_{H_2O,carvão} + mf_{mistura} N_{H_2O,biomassa} \quad (E.17)$$

Igualmente, a fração energética para a mistura ( $hf_{mistura}$ ) pode ser calculada mediante a Equação E.18:

$$hf_{mistura} = \frac{\dot{m}_{biomassa} PCI_{biomassa}}{\dot{m}_{carvão} PCI_{carvão} + \dot{m}_{biomassa} PCI_{biomassa}} \quad (E.18)$$

em que  $hf_{mistura}$  é a proporção de energia que entra ao processo de combustão em combustão combinada devido à biomassa. Desse modo, se a participação em base energética da biomassa é de 15%,  $hf_{mistura}$ , o valor será 0,15.

A energia fornecida pelo carvão e pela biomassa são dadas nas Equações E.19, E.20:

$$\dot{Q}_{carvão} = \dot{m}_{carvão} PCI_{carvão} \quad (E.19)$$

$$\dot{Q}_{biomassa} = \dot{m}_{biomassa} PCI_{biomassa} \quad (E.20)$$

onde

$$\dot{m}_{carvão} = (1 - mf_{mistura}) \dot{m}_{total} \quad (E.21)$$

e

$$\dot{m}_{biomassa} = mf_{mistura} \dot{m}_{total} \quad (E.22)$$

nas quais  $\dot{m}_{total}$  é a soma dos fluxos de massa do carvão e da biomassa entrando ao processo. O valor do PCI do carvão e da biomassa bem como os fluxos mássicos de ambos os combustíveis em diferentes condições de combustão combinada, foram apresentados no Apêndice C.

A Tabela E.1 mostra as frações molares das espécies propostas na equação de balanço para o cenário A e B, com uma participação da  $hf_{mistura}$  de até 30%. Para todos os casos, o EA é fixado em 20%.

Tabela E.1 – Fração molar das espécies por kg de combustível (cenário A com 100% carvão e cenário B com participação da biomassa em até 30% em base energética).

Espécie	Cenário A [100% Carvão]	Cenário B [10%]	Cenário B [20%]	Cenário B [30%]
b [kmol CO <sub>2</sub> /kg comb]	0,0384	0,0376	0,0369	0,0362
c [kmol H <sub>2</sub> O/kg comb]	0,0191	0,0211	0,0229	0,0245
d [kmol N <sub>2</sub> /kg comb]	0,399	0,388	0,378	0,368
e [kmol SO <sub>2</sub> /kg comb]	0,000365	0,000325	0,000288	0,000253
f [kmol O <sub>2</sub> /kg comb]	0,0162	0,0153	0,0145	0,0137

Com as frações molares, é possível determinar o fluxo mássico de cada uma das espécies, mediante a Equação E.23, dado em kg da espécie  $i$  por hora.

$$\dot{m}_{espécie\ i} = i M_{Wi} \dot{m}_{comb} \left[ \frac{3.600\ s}{1\ h} \right] \quad (E.23)$$

Com os fluxos calculados em [kg espécie  $i$ /h], com a Equação E.24, é possível obter um indicador que relacione a quantidade da espécie com a potência elétrica gerada na usina termoeletrica descrita no Apêndice C. Assim, o indicador dará a relação entre os kg da espécie associada à combustão por MWh. O MWh corresponde à unidade funcional considerada previamente no Capítulo 4, para a elaboração do inventário de ciclo de vida dos cenários avaliados.

$$I_{espécie\ i} = \left[ \frac{\dot{m}_{espécie\ i}}{\dot{W}_e} \right] \quad (E.24)$$

Na Equação (E.24),  $\dot{W}_e$  é a potência elétrica gerada na usina termoeletrica. O valor considerado nessa equação foi apresentado na Tabela C.1, no Apêndice C.

A Tabela E.2 mostra o valor do indicador obtido com o balanço proposto na primeira parte do modelo de combustão, com respeito ao CO<sub>2</sub> e o SO<sub>2</sub>.

Tabela E.2 – Indicador referente às espécies por MWh gerado (cenário A com 100% carvão e cenário B com participação da biomassa em até 30% em base energética).

Espécie		Cenário A [100% Carv.]	Cenário B [10%]	Cenário B [20%]	Cenário B [30%]
$I_{CO_2}$ [ $\frac{kg}{MWh}$ ]	$I_{CO_2}^{carv.}$	1.116	1.011	904	795
	$I_{CO_2}^{biom.}$	0	129	260	393
	$I_{CO_2}^{total}$	1.116	1.140	1.164	1.188
$I_{SO_2}$ [ $\frac{kg}{MWh}$ ]	$I_{SO_2}^{carv.}$	15,4	13,9	12,5	11
	$I_{SO_2}^{biom.}$	0	0,4	0,7	1,1
	$I_{SO_2}^{total}$	15,4	14,3	13,2	12,1

Os indicadores apresentam correspondência com os dados da EPA<sup>1</sup>, apresentados por Borman e Ragland (1998), para a queima de carvão betuminoso sem controle de emissões. Nota-se que, no cenário B, o  $I_{CO_2}$  cresce na medida que cresce a fração energética  $hf_{mistura}$ , o que era esperado, considerando o PCI dos combustíveis envolvidos no processo. Contudo, é importante lembrar que o  $CO_2$  liberado pela parcela correspondente à biomassa foi previamente sequestrado na fotossíntese. Considerando essas informações, torna-se evidente que o indicador diminui consideravelmente à medida que aumenta a fração energética aportada pela biomassa. O indicador do  $SO_2$  diminui devido ao baixo conteúdo de enxofre na composição química da biomassa (ver Tabela 4.4).

Com as espécies identificadas na Tabela E.1, a seguir, é realizado o cálculo mediante equilíbrio químico de outras espécies de interesse que não foram possíveis identificar mediante a aproximação estequiométrica. Para este fim, foi usado o programa CEA<sup>2</sup>, o qual é um código em FORTRAN para o cálculo de estados de equilíbrio químico de misturas. O método de solução empregado é do elemento potencial amplamente utilizado na solução de sistemas de equações em sistemas quimicamente reagentes, quando o número de espécies excede o número de elementos constituintes do sistema reativo.

A Tabela E.3 apresenta as frações molares obtidas mediante o equilíbrio químico para o cenário A e para o cenário B com até 30% da fração energética aportada pela biomassa. As espécies consideradas

<sup>1</sup>EPA: *Environmental Protection Agency* nos Estados Unidos.

<sup>2</sup>Por se tratar de um código fonte de livre utilização, a documentação detalhada do programa, a qual inclui a descrição do método de solução do elemento potencial, ao igual que o programa, encontrasse disponível em: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/ceaHome.htm>

para o equilíbrio foram adotadas do modelo proposto por Repic *et al.* (1999) e apresentadas na primeira coluna da Tabela E.3.

Tabela E.3 – Espécies consideradas em equilíbrio químico em [kmol espécie *i*/kg comb].

Espécie	Cenário A [100% Carvão]	Cenário B [10%]	Cenário B [20%]	Cenário B [30%]
CO <sub>2</sub>	$3,84 \times 10^{-2}$	$3,76 \times 10^{-2}$	$3,69 \times 10^{-2}$	$3,62 \times 10^{-2}$
CO	$3,60 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-9}$	$3,56 \times 10^{-9}$
CH <sub>4</sub>	$7,83 \times 10^{-37}$	$1,05 \times 10^{-36}$	$1,36 \times 10^{-36}$	$1,71 \times 10^{-36}$
H <sub>2</sub> O	$1,91 \times 10^{-2}$	$2,11 \times 10^{-2}$	$2,28 \times 10^{-2}$	$2,45 \times 10^{-2}$
N <sub>2</sub>	$3,99 \times 10^{-1}$	$3,88 \times 10^{-1}$	$3,78 \times 10^{-1}$	$3,68 \times 10^{-1}$
NO <sub>2</sub>	$2,67 \times 10^{-7}$	$2,52 \times 10^{-7}$	$2,37 \times 10^{-7}$	$2,24 \times 10^{-7}$
N <sub>2</sub> O	$2,82 \times 10^{-9}$	$2,70 \times 10^{-9}$	$2,58 \times 10^{-9}$	$2,48 \times 10^{-9}$
O <sub>2</sub>	$1,62 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-2}$	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,37 \times 10^{-2}$
SO <sub>2</sub>	$3,61 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-4}$	$2,60 \times 10^{-4}$	$2,54 \times 10^{-4}$

Os valores dados na Tabela E.4, obtidos com as Equações E.23 e E.24, são, finalmente, utilizados no inventário do ciclo de vida realizado na Seção 4.2. Pode-se observar que, se comparados com os indicadores apresentados na Tabela E.2, no caso do CO<sub>2</sub>, os valores são bem próximos, considerando que a parcela de CO é de ordem de grandeza relativamente pequena. O indicador para o SO<sub>2</sub> mantém a mesma proporção. No entanto, o valor é reduzido, dado que, no modelo de equilíbrio, foi considerada a formação de outras espécies, tais como o S<sub>2</sub>, o SO e o SO<sub>3</sub>, que foram consideravelmente baixas e, portanto, desconsideradas para o inventário de ciclo de vida.

Tabela E.4 – Indicador das espécies em [kg espécie  $i$ /MWh].

Espécie	Cenário A [100% Carvão]	Cenário B [10%]	Cenário B [20%]	Cenário B [30%]
CO <sub>2</sub> [ $\frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$ ]				
CO <sub>2</sub> carvão	1.116	990	869	751
CO <sub>2</sub> biomassa	0	150	294	438
CO <sub>2</sub> total	1.116	1.140	1.163	1.189
SO <sub>2</sub> [ $\frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$ ]				
SO <sub>2</sub> carvão	15,3	11,8	8,9	7,7
SO <sub>2</sub> biomassa	0	1,8	4,5	4,5
SO <sub>2</sub> total	15,3	13,6	11,9	12,2
CO [ $\frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$ ]				
CO <sub>carvão</sub>	$6,6 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$5,4 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$
CO <sub>biomassa</sub>	0	$9 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-5}$
CO <sub>total</sub>	$6,6 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-5}$	$7,4 \times 10^{-5}$
NO <sub>2</sub> [ $\frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$ ]				
NO <sub>2</sub> carvão	$8,1 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$
NO <sub>2</sub> biomassa	0	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-3}$
NO <sub>2</sub> total	$8,1 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-3}$
N <sub>2</sub> O [ $\frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$ ]				
N <sub>2</sub> O <sub>carvão</sub>	$8,2 \times 10^{-5}$	$7,1 \times 10^{-5}$	$6,08 \times 10^{-5}$	$5,14 \times 10^{-5}$
N <sub>2</sub> O <sub>biomassa</sub>	0	$1,1 \times 10^{-5}$	$2,06 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
N <sub>2</sub> O <sub>total</sub>	$8,2 \times 10^{-5}$	$8,18 \times 10^{-5}$	$8,14 \times 10^{-5}$	$8,14 \times 10^{-5}$
CH <sub>4</sub> [ $\frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$ ]	$8,3 \times 10^{-33}$	$1,11 \times 10^{-32}$	$1,4 \times 10^{-32}$	$1,8 \times 10^{-32}$
H <sub>2</sub> O	227	261	294	300
N <sub>2</sub>	7.375	7.476	7.572	7.699
O <sub>2</sub>	343	337	331	327